

QUANTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO DE AÇÚCAR, ÁLCOOL E ENERGIA
EXCEDENTE EM UMA USINA SUCROALCOOLEIRA ATRAVÉS DA
FERRAMENTA QUANTIFICA

Matheus Ribeiro dos Reis Silva

PROJETO FINAL SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO
DE ENGENHARIA MECÂNICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
ENGENHEIRO MECÂNICO.

Aprovado por:

Prof Silvio Carlos Anibal de Almeida, DSc.

Prof. Átila Pantaleão Silva Freire, PhD.

Profa. Juliana Braga Rodrigues Loureiro, DSc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
ABRIL DE 2013

Reis Silva, Matheus Ribeiro dos

Quantificação da produção de açúcar, álcool e energia excedente em uma usina sucroalcooleira através da ferramenta Quantifica/ Matheus Ribeiro dos Reis Silva - Rio de Janeiro: UFRJ / Escola Politécnica, 2013.

XI, 66 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Silvio Carlos Anibal de Almeida

Projeto de Graduação - UFRJ / Escola Politécnica / Curso de Engenharia Mecânica, 2013.

Referências Bibliográficas: p. 74-76.

1. Quantifica 2. Usina sucroalcooleira 3. Açúcar 4. Álcool 5. Energia excedente I. Almeida, Silvio Carlos Anibal de II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Mecânica III. Título.

Agradecimentos

Agradeço de maneira geral a todos que estiveram ao meu lado durante os anos de graduação e a todos que direta ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço especialmente aos meus familiares, aqueles que constituem a base de tudo o que sou hoje, e que me apoiaram em todas as escolhas e caminhos traçados: Valdo, pai trabalhador e exemplo de vida; Gisela, mãe guerreira e companheira; Marcelo e Marina, irmãos amigos que terei sempre ao lado para o que precisar.

A minha namorada Beatriz, cujo amor, carinho, atenção e conselhos foram fundamentais para a conclusão do último ano da graduação.

Ao professor Silvio Carlos, pela atenção e valiosa orientação.

Aos colegas da Engenharia Mecânica, principalmente Caio Croce e Guilherme Curvacho, por tornarem o dia a dia de aulas mais agradável e divertido.

Aos valiosos amigos/ irmãos que tive o prazer de ganhar durante os dois anos de duplo diploma na Ecole Centrale Paris, os quais carregarei para a vida inteira, independente da distância.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Mecânica.

Quantificação da produção de açúcar, álcool e energia excedente em uma usina sucroalcooleira através da ferramenta Quantifica

Matheus Ribeiro dos Reis Silva

Abril/ 2013

Orientador: Silvio Carlos Anibal de Almeida

Curso: Engenharia Mecânica

O objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento de uma ferramenta de simulação em Microsoft Excel, capaz de quantificar a produção de açúcar e álcool em uma usina sucroalcooleira, assim como a geração de energia e a quantidade de energia excedente disponível para comercialização. Além disso, a ferramenta também fornece uma análise financeira, calculando o tempo necessário para retorno de investimento para construção da usina.

Para utilização da ferramenta Quantifica, inicialmente o usuário realiza uma etapa de inserção de dados, onde o mesmo irá fornecer todas as informações necessárias para a efetuação dos cálculos necessários. Estes dados incluem desde propriedades da cana e tipo de extração até parâmetros produção de açúcar e álcool e custos de produção e preços de venda dos produtos da usina. Uma vez inseridos todos os dados, a ferramenta realiza os cálculos e apresenta os resultados.

Para validação da consistência desses resultados e consequentemente da ferramenta como um todo, foi realizado um estudo de caso, onde é feita uma comparação entre dados reais de uma usina e os valores obtidos através de simulação.

Palavras-chave: Quantifica, Usina sucroalcooleira, Açúcar, Álcool, Energia excedente.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

Quantification of the production of sugar, alcohol and surplus energy in a sugarcane mill using the Quantifica tool

Matheus Ribeiro dos Reis Silva

April/ 2013

Advisors: Silvio Carlos Anibal de Almeida

Course: Mechanical Engineering

The objective of this study was the development of a simulation tool in Microsoft Excel, which enables the quantification of the production of sugar and alcohol in a sugarcane mill, as well as the energy generation and the available surplus energy for commercialization. Besides, the tool provides a financial analysis, calculating the time necessary for the return of the investment made for the construction of the mill.

When using the Quantifica tool, the user will initially go through a phase of data input, in which he will enter all the necessary information for the calculation. These pieces of data include the properties of the sugarcane, type of sugarcane juice extraction, parameters of the sugar and alcohol production, production costs and sales prices for the end products of the mill. Once all the data is inputted, the tool will make the calculation and present the results.

In order to validate the consistency of this results and consequently of the developed tool, a case study was performed, in which it is made a comparison between data from a real sugarcane mill and the values obtained through simulation.

Keywords: Quantifica, Sugarcane mill, Sugar, Alcohol, Surplus energy.

Índice

1 - INTRODUÇÃO	11
1.1 OBJETIVOS DO TRABALHO	14
1.2 METODOLOGIA	15
1.3 ESTRUTURA	15
2 - A CANA-DE-AÇÚCAR	17
3 - A COLHEITA.....	19
4 - O PROCESSO PRODUTIVO.....	20
4.1 A RECEPÇÃO DA CANA	21
4.2 A LAVAGEM	21
4.3 O PROCESSO DE EXTRAÇÃO.....	22
4.3.1 A extração por moagem	22
4.3.2 A extração por difusão	23
4.4 PRODUÇÃO DE AÇÚCAR E DE ÁLCOOL	26
4.4.1 Mix de produção da usina	26
4.4.2 Produção de açúcar	27
4.4.3 Produção de álcool	28
5 - PRODUÇÃO DE ENERGIA NA USINA.....	31
5.1 OS COMBUSTÍVEIS: BAGAÇO E PALHA.....	31
5.1.1 O bagaço da cana	31
5.1.2 A palha.....	32
5.2 PRODUÇÃO/ CONSUMO DE ENERGIA.....	33
6 - A FERRAMENTA QUANTIFICA	38
6.1 ABA 1: SAFRA, LAVAGEM E EXTRAÇÃO	40
6.1.1 Dados da safra e propriedades da cana-de-açúcar.....	40
6.1.2 Colheita.....	42
6.1.3 A lavagem da cana-de-açúcar.....	42
6.1.4 A extração do caldo da cana:	44
6.1.5 Os combustíveis energéticos: o bagaço e a palha	45
6.2 ABA 2: DADOS DA PRODUÇÃO	47
6.2.1 O mix de produção da usina.....	47
6.2.2 A produção/ consumo de energia na usina	49
6.2.3 A produção de açúcar	50
6.2.4 A produção de álcool.....	51
6.3 ABA 3: DADOS FINANCEIROS	53
6.3.1 O investimento inicial e a taxa de inflação.....	53
6.3.2 Custos de produção	54
6.3.3 Preços de venda	56
6.4 ABA 4: RESULTADOS DA PRODUÇÃO	57
6.5 ABA 5: ENERGIA EXCEDENTE.....	60
6.6 ABA 6: RESULTADOS FINANCEIROS	64
7 - ESTUDOS DE CASO	66

8 - CONCLUSÕES	74
9 - REFERÊNCIA	80
APÊNDICE A.....	84
APÊNDICE B.....	85

Índice de Figuras

FIGURA 1.1: EVOLUÇÃO DA PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR NO BRASIL	11
FIGURA 1.2: EVOLUÇÃO DA PRODUÇÃO DE AÇÚCAR NO BRASIL	12
FIGURA 1.3: EVOLUÇÃO DA PRODUÇÃO DE ÁLCOOL NO BRASIL.....	13
FIGURA 1.4: RESUMO DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS DE ENTRADA E RESULTADOS DA FERRAMENTA	14
FIGURA 2.1: COMPOSIÇÃO FISIOLÓGICA DA CANA-DE-AÇÚCAR	17
FIGURA 4.1: DIAGRAMA DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE AÇÚCAR E ÁLCOOL	20
FIGURA 4.2: ESQUEMA DE EXTRAÇÃO DE CALDO EM MOENDA	23
FIGURA 4.3: ESQUEMA DE UM DIFUSOR	24
FIGURA 5.1: FLUXOGRAMA ESQUEMÁTICO RESUMIDO DO CICLO DE GERAÇÃO DE ENERGIA (ELÉTRICA E MECÂNICA) EM UMA USINA SUCROALCOOLEIRA	34
FIGURA 6.1: CÓDIGO DE CORES UTILIZADO PARA INSERÇÃO DE DADOS NA FERRAMENTA....	39
FIGURA 6.2: QUADRO DE ENTRADA DE DADOS DA SAFRA E PROPRIEDADES DA CANA-DE-AÇÚCAR	40
FIGURA 6.3: PARÂMETROS PARA DEFINIÇÃO DA QUANTIDADE DE ART NA CANA	41
FIGURA 6.4: QUADRO DE ENTRADA DE DADOS DE COLHEITA	42
FIGURA 6.5: QUADRO DE ENTRADA DE DADOS DA LAVAGEM DA CANA	43
FIGURA 6.6: QUADRO DE ENTRADA DE DADOS DE EXTRAÇÃO DO CALDO.....	44
FIGURA 6.7: QUADRO DE ENTRADA DAS PROPRIEDADES DO BAGAÇO E DA PALHA	45
FIGURA 6.8: PARÂMETROS PARA DEFINIÇÃO DA QUANTIDADE DE BAGAÇO DISPONÍVEL	46
FIGURA 6.9: PARÂMETROS PARA O CÁLCULO DA QUANTIDADE DE PALHA DISPONÍVEL	46
FIGURA 6.10: QUADRO DE ENTRADA DO MIX DE PRODUÇÃO DA USINA	47
FIGURA 6.11: DIAGRAMA RESUMIDO DO PROCESSO DE PRODUÇÃO: BALANÇO DE ART.....	48
FIGURA 6.12: DIAGRAMA RESUMIDO DO PROCESSO DE PRODUÇÃO: BALANÇO DE ART, EXEMPLO NUMÉRICO.....	48
FIGURA 6.13: QUADRO DE ENTRADA DE DADOS RELACIONADOS À PRODUÇÃO/ CONSUMO DE ENERGIA	49
FIGURA 6.14: QUADRO DE ENTRADA DE DADOS SOBRE A PRODUÇÃO DE AÇÚCAR	50
FIGURA 6.15: QUADRO DE ENTRADA DE DADOS SOBRE A PRODUÇÃO DE ÁLCOOL.....	52

FIGURA 6.16: QUADRO DE ENTRADA DO INVESTIMENTO INICIAL E TAXA DE INFLAÇÃO	54
FIGURA 6.17: QUADRO DE ENTRADA DOS CUSTOS DE PRODUÇÃO DA USINA	54
FIGURA 6.18: QUADRO DE ENTRADA DOS PREÇOS DE VENDA DOS PRODUTOS FINAIS DA USINA	56
FIGURA 6.19: APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS – PRODUÇÃO DE AÇÚCAR BRANCO E VHP, ÁLCOOL HIDRATADO E ANIDRO E VINHAÇA	59
FIGURA 6.20: APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS – MIX DE PRODUÇÃO DA USINA	60
FIGURA 6.21: APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS – DISPONIBILIDADE DE PALHA	61
FIGURA 6.22: APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS – DISPONIBILIDADE DE BAGAÇO	62
FIGURA 6.23: APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS – GERAÇÃO, CONSUMO E COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA.....	63
FIGURA 6.24: APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS – RESULTADOS ANUAIS	64
FIGURA 6.25: APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS – GRÁFICO DE ACUMULAÇÃO DE LUCROS	65
FIGURA 7.1: TEMPO NECESSÁRIO PARA RETORNO DE INVESTIMENTO	73
FIGURA 7.2: INFLUÊNCIA DA PERCENTAGEM DE MECANIZAÇÃO NO TEMPO NECESSÁRIO PARA RETORNO DE INVESTIMENTO	74
FIGURA 7.3: INFLUÊNCIA DO PREÇO DE VENDA DE AÇÚCAR E ÁLCOOL NO TEMPO NECESSÁRIO PARA RETORNO DE INVESTIMENTO	76
FIGURA 7.4: INFLUÊNCIA DO VALOR DO INVESTIMENTO NO TEMPO NECESSÁRIO PARA RETORNO DE INVESTIMENTO	77

Índice de Tabelas

TABELA 2.1: COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA CANA-DE-AÇÚCAR.....	18
TABELA 4.1: COMPARAÇÃO ENTRE AS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DA MOAGEM E DA DIFUSÃO	25
TABELA 7.1: PARÂMETROS REFERENTES A PRODUÇÃO DE AÇÚCAR E ÁLCOOL	67
TABELA 7.2: COMPARAÇÃO ENTRE VALORES REAIS E SIMULADOS: PRODUÇÃO DE AÇÚCAR E ÁLCOOL	68
TABELA 7.3: PARÂMETROS PARA CARACTERIZAÇÃO DA COLHEITA.....	69
TABELA 7.4: DADOS REFERENTES AO BAGAÇO E TIPO DE EXTRAÇÃO.....	70
TABELA 7.5: DADOS SOBRE A GERAÇÃO E CONSUMO DE ENERGIA NA USINA	70
TABELA 7.6: COMPARAÇÃO ENTRE VALORES REAIS E SIMULADOS: GERAÇÃO, CONSUMO INTERNO E VENDA DE EXCEDENTE DE ENERGIA.....	71
TABELA 7.7: PARÂMETROS FINANCEIROS	72
TABELA 7.8: TEMPO NECESSÁRIO PARA RETORNO DO INVESTIMENTO SEGUNDO MECANIZAÇÃO DA COLHEITA	75
TABELA 7.9: TEMPO NECESSÁRIO PARA RETORNO DO INVESTIMENTO SEGUNDO PREÇO DE VENDA DO AÇÚCAR E DO ÁLCOOL.....	76
TABELA 7.10: TEMPO NECESSÁRIO PARA RETORNO DO INVESTIMENTO SEGUNDO VALOR DO INVESTIMENTO INICIAL.....	78

1 - Introdução

O aumento da cultura da cana-de-açúcar é algo notório e contínuo, ao longo de toda a história. O Brasil contribui de maneira importante para esta tendência sendo atualmente o maior produtor de cana-de-açúcar no mundo, seguido pela Índia, Tailândia e Austrália (Ministério da Agricultura, 2013). A Figura 1.1 mostra a evolução da produção de cana-de-açúcar no Brasil.

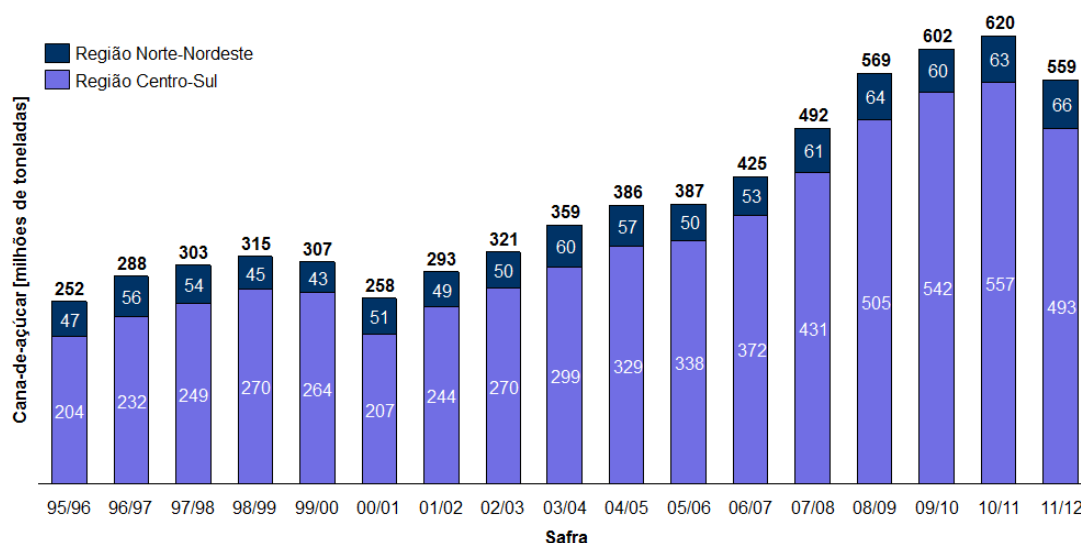


Figura 1.1: Evolução da produção de cana-de-açúcar no Brasil (ÚNICA, 2013)

Introduzida no período colonial, a cana-de-açúcar se transformou em uma das principais culturas da economia brasileira (BNDES, 2013). Os principais produtos derivados da cana são tradicionalmente o açúcar e o álcool, tanto combustível como industrial. O Brasil é também o maior produtor mundial de açúcar e álcool no mundo (Ministério da Agricultura, 2013), que representam um PIB de aproximadamente 96 bilhões de reais (Rural BE Agricultura, 2012), ou seja, 2% do PIB nacional (IBGE, 2013).

De alguns anos para cá, dado o alto potencial energético da biomassa residual gerada no processamento da cana, a venda de energia elétrica excedente também adquiriu grande importância nos resultados de uma usina sucroalcooleira.

O açúcar sempre teve papel fundamental na dieta diária do homem. Na época do início da colonização do Brasil, era um produto altamente valorizado, pois era escasso e representava uma importante fonte de energia para o organismo, o que contribuiu para a para transformar o país em um dos principais produtores no mundo (Machado, 2003). Além da contribuição nutricional à dieta diária é utilizado como matéria-prima na indústria de alimentos e bebidas. A Figura 1.2 mostra a evolução da produção de açúcar no Brasil.

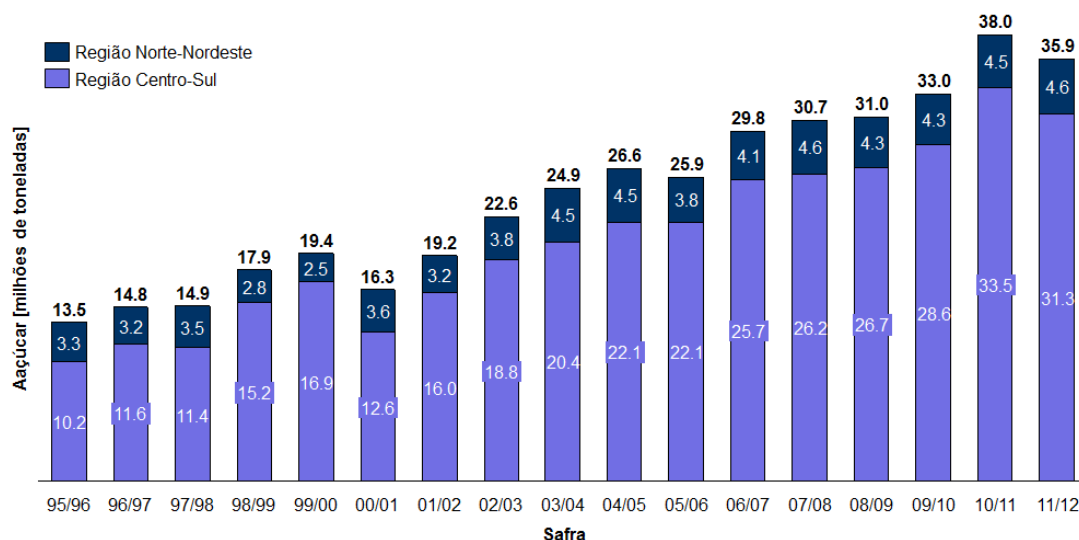


Figura 1.2: Evolução da produção de açúcar no Brasil
(ÚNICA, 2013)

O álcool é outro produto que possui grande importância no mercado brasileiro, principalmente após as crises mundiais do petróleo, na década de 70, quando o governo brasileiro criou o PROCALCOOL (plano de incentivo a produção e utilização de álcool como combustível no país). A utilização extensiva do álcool como combustível, seja em mistura de 25% com a gasolina, como combustível dos veículos equipados com motor a álcool ou, ainda, nos veículos com tecnologia *flex fuel* que operam com gasolina, álcool ou qualquer mistura desses combustíveis, confere ao País liderança no cenário internacional quanto ao sequestro de carbono e à mitigação do efeito estufa (UNICAMP, COPERSUCAR, 2004). Adicionalmente, o álcool é um combustível 100% brasileiro. A Figura 1.3 mostra a evolução da produção de álcool no Brasil.

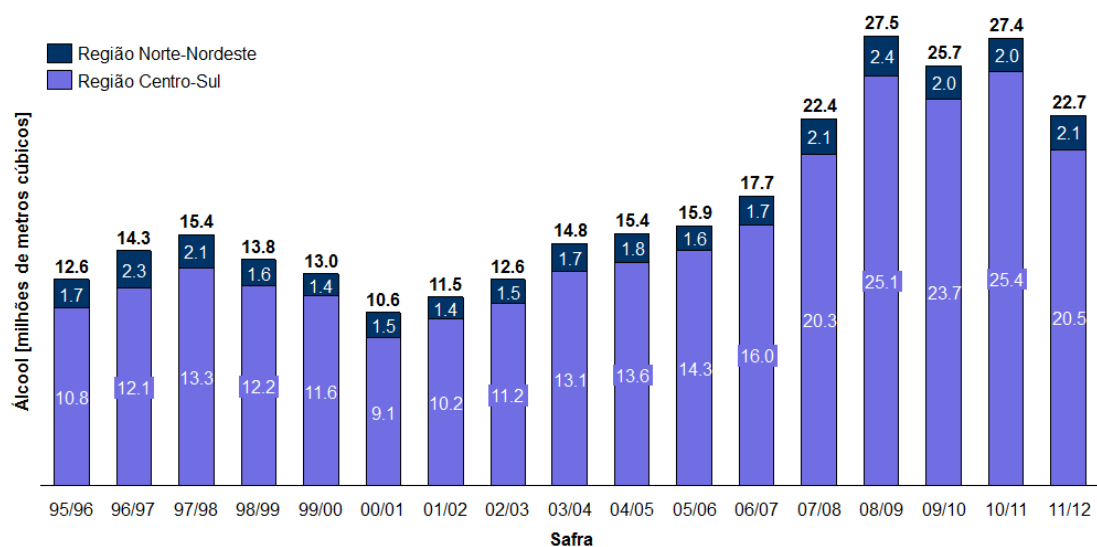


Figura 1.3: Evolução da produção de álcool no Brasil
(ÚNICA, 2013)

Além da importância que têm no mercado interno, o açúcar e o álcool ocupam posição de destaque nas exportações do agronegócio brasileiro. O país é responsável por 62% das exportações de açúcar no mundo e a participação brasileira no volume total comercializado de álcool no mundo atinge 53% da quantidade total vendida (Ministério da Agricultura, 2013).

Do ponto de vista energético, as usinas sucroalcooleiras no Brasil sempre foram autossuficientes, gerando praticamente toda a energia, elétrica e mecânica, necessárias para o processo produtivo. O processamento da cana para a produção de álcool e de açúcar resulta na geração de biomassa residual, o chamado bagaço. O bagaço é queimado em caldeiras, fornecendo energia para a geração de vapor, que é então utilizado em turbogeradores e acionadores mecânicos. Porém, historicamente o processo de geração nunca foi eficiente, pois o potencial energético era muito superior às necessidades do processo produtivo.

As preocupações ambientais com a emissão de gases de efeito estufa por combustíveis fósseis somadas ao estímulo, no Brasil, à geração independente e descentralizada, como forma de mitigar riscos após o apagão de 2001, estimularam a utilização mais eficiente do potencial energético da biomassa residual da cana. Além do bagaço, a palha da cana, cujo potencial energético é o dobro do anterior, não era aproveitada, sendo queimada nos campos da colheita.

Dentro deste contexto, o setor sucroalcooleiro merece uma posição de destaque no cenário nacional, e a análise de usinas sucroalcooleiras tem ganhado grande interesse, e é, portanto, objeto de estudo deste trabalho.

1.1 - Objetivos do trabalho

Este trabalho teve dois grandes objetivos:

O primeiro objetivo foi a descrição geral do processo produtivo de açúcar, álcool e energia em uma usina sucroalcooleira, desde a colheita da cana-de-açúcar até a obtenção dos produtos finais

O segundo e principal objetivo foi o desenvolvimento de uma ferramenta em Microsoft Excel para quantificar a produção de açúcar e de álcool e a disponibilidade de energia elétrica excedente para comercialização em uma usina, a partir de dados fornecidos pelos usuários. Esta ferramenta, nomeada de Quantifica, tem o intuito de ser uma fonte de consulta e de auxílio a proprietários de usinas e também a potenciais investidores no mercado sucroalcooleiro, fornecendo-os uma base inicial para tomadas de decisões.

A Figura 1.4 mostra os principais dados que o usuário deverá fornecer, e os principais resultados gerados pela ferramenta.

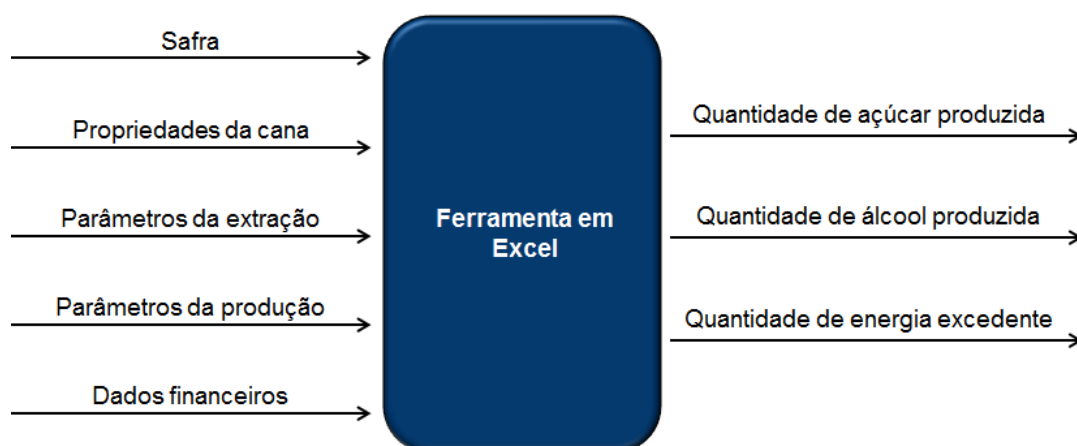


Figura 1.4: Resumo dos principais parâmetros de entrada e resultados da ferramenta

1.2- Metodologia

Na abordagem metodológica utilizada para o cumprimento dos objetivos deste trabalho adotou-se o seguinte procedimento:

1. Extensiva pesquisa bibliográfica seguida de refinamento dos dados e adaptações de procedimentos descritos na literatura científica sobre o setor sucroalcooleiro e o processo de produção de açúcar e álcool e de geração de energia;
2. Desenvolvimento da ferramenta Quantifica utilizando a plataforma Microsoft Excel. A ferramenta foi desenvolvida com o intuito de ser autoexplicativa e, desta forma, tornar possível a sua utilização mesmo por usuários que não tenham um nível de conhecimento elevado sobre o funcionamento de uma usina sucroalcooleira;
3. Realização de um estudo de caso, com o objetivo de validar a consistência dos resultados fornecidos pela ferramenta. O estudo de caso foi realizado utilizando-se dados reais de uma usina localizada no sul do Brasil.

1.3- Estrutura

A organização deste trabalho foi realizada da seguinte maneira:

Neste primeiro capítulo introdutório, é apresentado um panorama geral do setor sucroalcooleiro brasileiro e sua relevância no país. São expostos os objetivos do trabalho e a metodologia seguida para o seu desenvolvimento.

O segundo capítulo apresenta a cana-de-açúcar, a principal matéria prima do setor sucroalcooleiro. São apresentadas as composições fisiológica e química da cana, assim como os principais parâmetros de sua composição que mais influenciam na produção de açúcar e álcool.

O terceiro capítulo dá uma visão geral do processo de colheita da cana. O capítulo é introduzido com um breve contexto histórico do processo e finalizado com uma apresentação de como ele vem sendo realizado hoje, nas diferentes regiões do Brasil, e quais as tendências para o futuro próximo.

O quarto capítulo apresenta o processo de produção de açúcar e de álcool em uma usina. O capítulo é iniciado introduzindo-se uma visão geral do processo de produção. Em seguida é feito o detalhamento de cada uma das etapas que compõem o ciclo produtivo. Especificamente nas seções 4.4.2 e 4.4.3, são expressas todas as formulações teóricas para os cálculos de produção.

Já o quinto capítulo fornece uma explicação sobre a geração de energia em uma usina sucroalcooleira. Este capítulo é iniciado com uma apresentação dos dois principais combustíveis energéticos na usina, o bagaço e a palha. Em seguida, na seção 5.2, é expressa a formulação teórica para os cálculos de geração, consumo interno e a disponibilidade de energia para venda à rede elétrica.

No sexto capítulo a ferramenta desenvolvida é descrita detalhadamente. Este capítulo representa basicamente um manual de instruções para a utilização da mesma, apresentando cada uma das abas que a compõem, guiando o usuário através das informações que devem ser inseridas, e de que forma os resultados são apresentados.

No sétimo capítulo é realizado um estudo de caso utilizando dados reais de uma usina brasileira, com o intuito de validar a consistência dos resultados fornecidos pela ferramenta desenvolvida. No capítulo são apresentados todos os parâmetros utilizados como dados de entrada na ferramenta assim como os resultados obtidos e a comparação dos mesmos com os dados reais.

O oitavo capítulo proporciona uma retomada dos objetivos e os compara com os resultados alcançados, abrangendo as principais conclusões do trabalho.

O nono e último capítulo lista as referências utilizadas para o desenvolvimento deste trabalho.

2 - A cana-de-açúcar

A cana de açúcar é a principal matéria-prima da indústria sucroalcooleira. Do ponto de vista industrial da fabricação de açúcar e álcool, a cana é composta de caldo e fibra, sendo o primeiro a matéria prima propriamente dita.

A Figura 2.1 é um desenho ilustrativo da composição fisiológica da cana-de-açúcar.

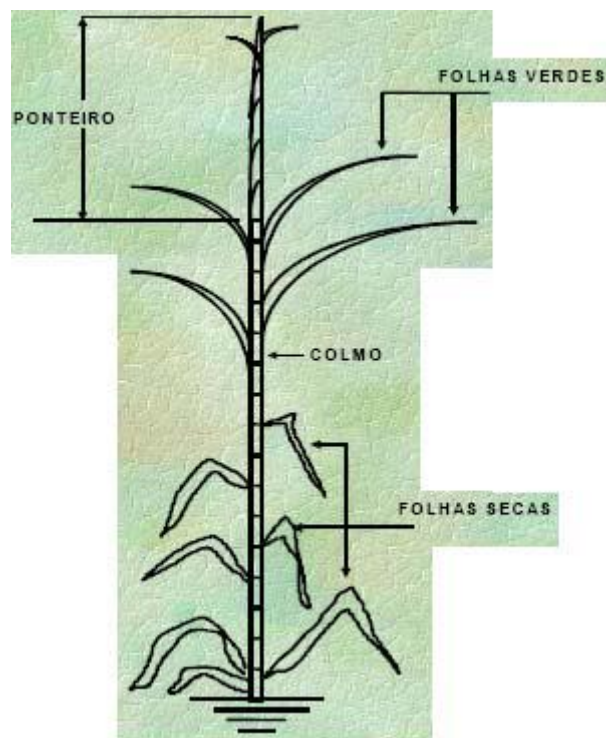


Figura 2.1: Composição fisiológica da cana-de-açúcar
(Centro de Tecnologia Canavieira - CTC)

O caldo da cana e grande parte das fibras estão concentrados no colmo, que é o caule da planta. O resto das fibras se encontra na palha, composta pelas folhas verdes e secas e os ponteiros. A palha pode representar de 11% a 17% da cana inteira (Cortez *et al.*, 2010)

A Tabela 2.1 apresenta a composição química média da cana-de-açúcar.

Tabela 2.1: Composição química da cana-de-açúcar

Componente	Variação na cana
Umidade	69 - 72 %
Brix	15 - 20 %
Sacarose (pol)	13 - 18 %
Açúcares Redutores	0,2 - 1,0 %
Fibras	11 - 13 %
N	200 - 600 mg/kg
P – P ₂ O ₅	60 - 300 mg/kg
Ca – CaO	1200 - 2500 mg/kg
Mg – MgO	44 - 200 mg/kg
S – SO ₃	120 - 300 mg/kg
Gomas e Pectinas	150 - 250 mg/kg
Ceras e Gorduras	150 - 350 mg/kg
Amido	50 - 600 mg/kg
Ácidos Orgânicos	200 - 550 mg/kg

Fonte: UMERABA, 2010

Segundo Kytaima (2007), se olharmos para a cana de um ponto de vista energético, 1/3 da energia total provém do bagaço da cana, que é originário do colmo, 1/3 provém da palha, presente em menor quantidade que o colmo, mas com o dobro do potencial energético e o 1/3 restante é provém de um dos produtos finais de uma usina, o álcool.

Para a produção de açúcar e álcool, os principais parâmetros são aqueles listados a seguir:

¶ **Açúcares redutores na cana [%]:**

Índice do teor de açúcares redutores, glicose e frutose, na composição total da cana-de-açúcar, em percentagem mássica.

¶ **Polarização da cana (POL) [%]:**

É o principal parâmetro para medição da qualidade da cana-de-açúcar para a indústria sucroalcooleira. Representa o índice do teor de sacarose na composição total da cana-de-açúcar, em percentagem mássica. A sacarose é a principal matéria

prima para a produção de açúcar e álcool, e, portanto, quanto maior a polarização da cana, maior será o potencial de produção de uma usina.

O teor de açúcares redutores (glicose e frutose) e a polarização da cana determinam a quantidade de açúcar redutor total (ART) da cana, que é, de fato, a quantidade de açúcar total presente na cana.

A Equação 2.1 é utilizada para se obter a quantidade de ART da cana, em % (Fernandes, 2000):

$$ART \text{ da Cana } [\%] = \text{Açúcares Redutores} + \frac{POL}{0,95} \quad (2.1)$$

Como será visto mais adiante, os cálculos relativos à produção de açúcar e álcool são todos baseados no fluxo de massa de ART ao longo da cadeia de produção, ou seja, do balanço de ART.

3 - A colheita

Historicamente a colheita da cana-de-açúcar sempre foi feita de maneira manual, o que resultava em baixa eficiência, de tempo e de quantidade de cana transportada para a usina, em comparação à quantidade de cana plantada. Além disso, neste método tradicional de colheita manual da cana-de-açúcar aplica-se a queima da palha da planta antes do corte e da colheita, eliminando a possibilidade de utilização da palha, cujo PCI é praticamente o dobro do bagaço (Romão Júnior, 2009), para geração de energia elétrica, além de gerar impactos ambientais.

A progressiva evolução da colheita mecanizada da cana-de-açúcar e consequente eliminação das queimadas vêm proporcionando uma redução nos impactos ambientais

antigamente gerados e um aumento significativo no volume de biomassa disponível para a geração elétrica, visto que é transportada para a usina, além do colmo da cana, a palha.

Atualmente no Brasil, nos estados mais desenvolvidos como São Paulo e Paraná, a colheita em uma unidade de plantação é majoritariamente mecanizada, com alguma parte ainda sem feito de forma manual. No Nordeste, ainda é muito comum a prática da colheita manual.

4 - O processo produtivo

O processo de produção de açúcar e álcool é igual em suas etapas iniciais: a recepção na usina da cana colhida, o processo de lavagem da cana e a extração do caldo. A Figura 4.1 mostra um diagrama resumido de como foi modelizado na ferramenta o processo de produção.

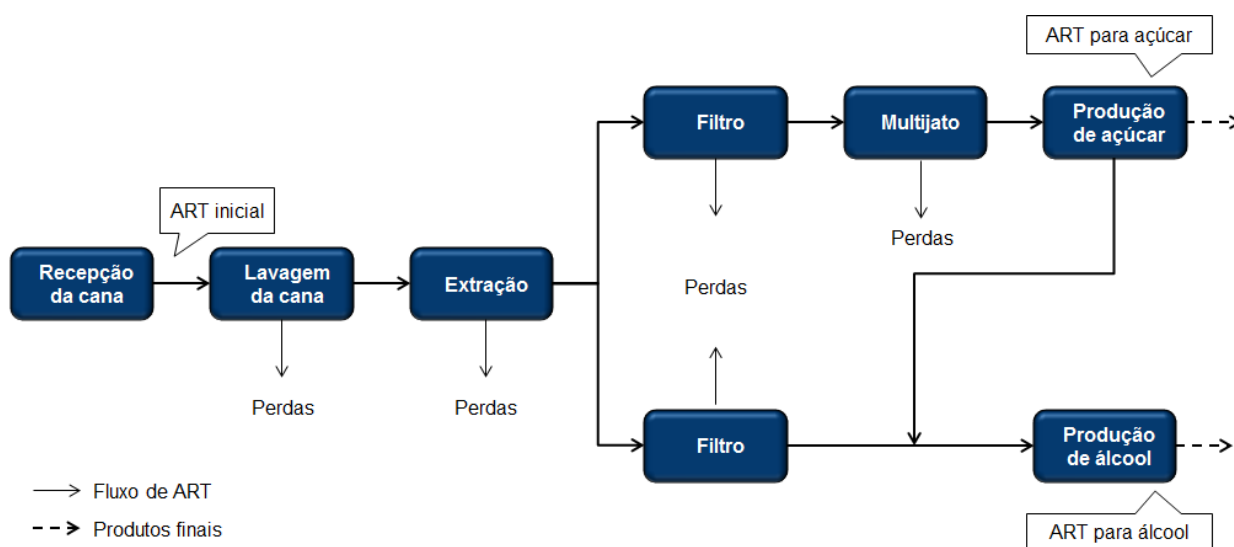


Figura 4.1: Diagrama do processo de produção de açúcar e álcool
(Elaboração própria)

Uma vez extraído, o caldo da cana é direcionado para a produção de açúcar e álcool, em quantidades definidas pelo mix de produção da usina. Visto que não constitui parte dos objetivos deste estudo, não será dada uma explicação detalhada dos processos físico-químicos relacionados à produção tanto de açúcar quanto de álcool.

A seguir são apresentadas as descrições de cada uma das grandes etapas da produção, representadas pelas caixas azuis na Figura 4.1.

4.1 - A recepção da cana

De acordo com Mezaroba *et al.* (2010), a recepção da cana na usina segue os seguintes procedimentos:

- ¶ Pesagem da cana;
- ¶ Amostragem, onde é retirada uma amostra que será analisada em laboratório para determinação do ART da cana recebida;
- ¶ Estocagem, feita para suprir possíveis faltas de cana.

4.2 - A lavagem

Como foi dito anteriormente, tradicionalmente a cana-de-açúcar era queimada antes da colheita, eliminando-se assim a palha e outros componentes vegetais. Mesmo com grande parte das impurezas vegetais sendo eliminada antes da chegada à usina, a cana precisava ser lavada com água para torná-la totalmente preparada para o processo de extração e produção, eliminando as impurezas restantes (vegetais e minerais). No entanto, o processo de lavagem com água é acompanhado de uma perda expressiva de ART, da ordem de 5%, o que é desvantajoso para o processo de produção (Romão Júnior, 2009).

Com a evolução da colheita mecanizada, era necessário o surgimento de uma maneira eficiente de separar a palha do colmo da cana que chegava às usinas. A opção que vem sendo utilizada no mercado é a lavagem de cana-de-açúcar a seco, que além de permitir

uma separação eficiente da palha, que poderá ser enviada diretamente para queima na caldeira, reduz a perda de ART na lavagem à praticamente zero (Jornal USP, 2009).

O sistema de lavagem a seco possui etapas: um processo de sopragem através de ventiladores, que promove a separação da palha e um processo por ação mecânica por meio de separadores ou mesas de fundo furado, que fazem o revolvimento do material para obter a separação das impurezas minerais (Romão Júnior, 2009).

4.3- O processo de extração

Uma das etapas mais importantes da produção de açúcar e álcool em uma usina é a extração do caldo da cana. Os açúcares da cana, principal matéria prima dos produtos finais, estão altamente concentrados no caldo, e todo o processo de produção consiste na manipulação do caldo extraído para a obtenção dos produtos finais.

A extração do caldo da cana pode ser realizada basicamente de duas maneiras, através das moendas ou dos difusores. As duas opções são descritas a seguir.

4.3.1 A extração por moagem

No Brasil, a forma mais utilizada para a extração do caldo da cana se dá através da moagem. O equipamento utilizado neste tipo de extração é a moenda, que é um equipamento composto de uma sequência de ternos (de 4 a 7 ternos, Rocha 2010), que são conjuntos compostos de três cilindros cada, formando um triângulo, que produzem o esmagamento e consequente extração do caldo. Para aumentar a extração de sacarose no caldo, adiciona-se água à cana-de-açúcar após a passagem pelo primeiro terno da moenda, processo denominado embebição (Correa Neto *et al.*, 2002). De forma geral, quanto maior o teor de fibra da cana, maior deve ser o teor de adição de água durante a extração do caldo.

O caldo extraído no primeiro terno é denominado caldo primário, enquanto o caldo extraído em todo o resto da sequência é denominado caldo secundário. A mistura do caldo primário

e do caldo secundário compõe o caldo misto. A distribuição do caldo misto entre a fábrica de açúcar e a destilaria de álcool define o mix de produção da usina.

Na Figura 4.2 é possível ver um esquemático do moedor e do processo de moagem.

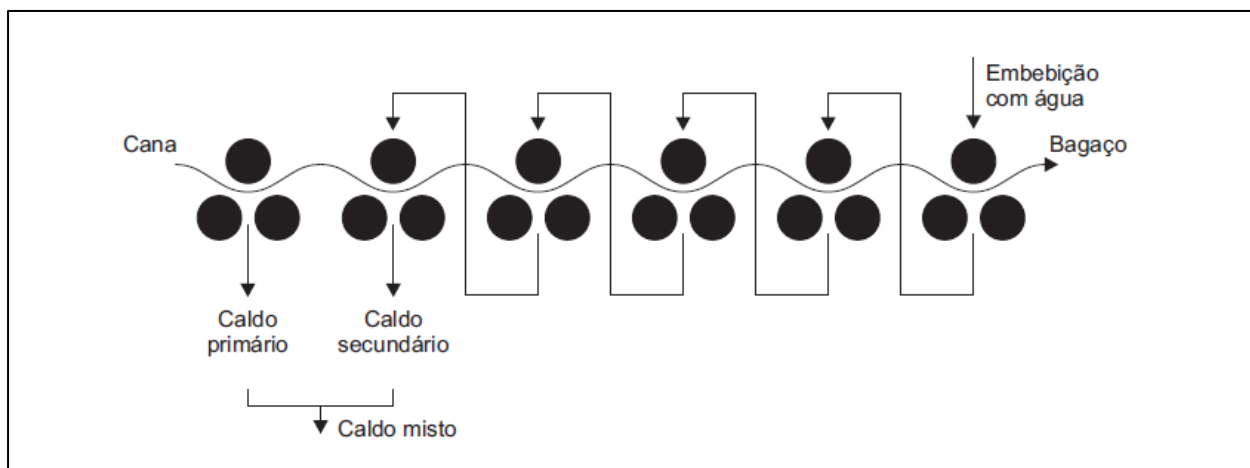


Figura 4.2: Esquema de extração de caldo em moenda
(*Dal Bem et al., 2006*)

4.3.2 A extração por difusão

No processo de extração por difusão, o equipamento utilizado é o difusor, onde a sacarose é extraída exclusivamente por um processo de lavagem repetitiva, passando por diluição para a solução de menor concentração. Esta é basicamente a razão principal da necessidade de uma excelente picagem e preparo de cana, de maneira a quebrar a membrana impermeável das células que compõem a cana, para que seja possível que a água entre em contato com o maior número de células abertas possível, e, assim, alcançar os elevados índices de extração no difusor.

Um esquemático do funcionamento de um difusor é mostrado na Figura 4.3.

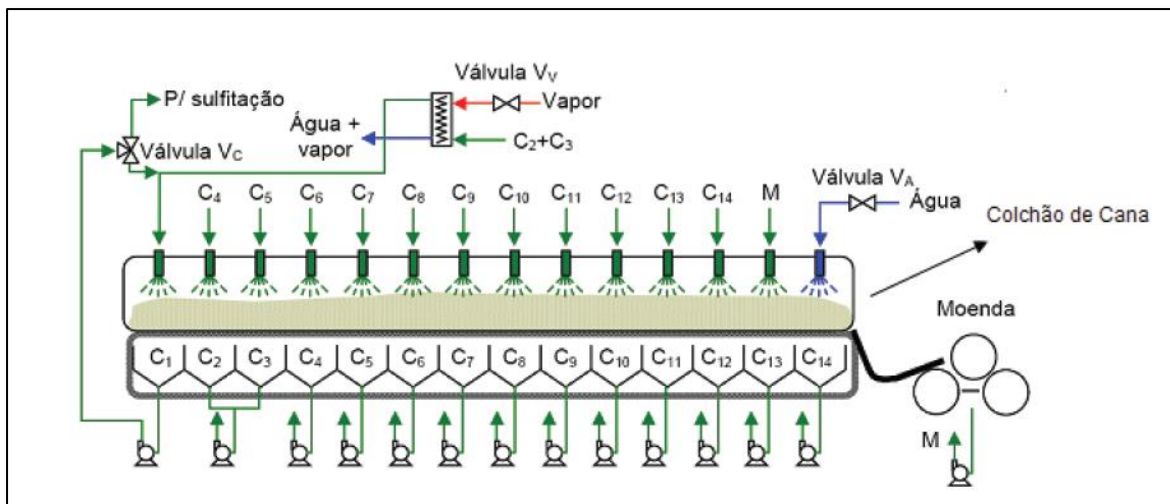


Figura 4.3: Esquema de um difusor
(Rocha, 2010)

Neste processo, o bagaço que sai do difusor ainda está encharcado, com umidade de aproximadamente 80%. Assim ele passa ainda por uma moenda que tem como finalidade retirar o excesso de água de modo que o mesmo possa ser utilizado nas caldeiras para geração de energia. O resultado final é normalmente um bagaço com umidade de 50%, similar à umidade do bagaço a extração por moagem (Dedini, 2011).

Na extração por difusão, não há nenhuma distinção entre caldo primário e caldo secundário. O caldo extraído é denominado caldo misto e qual parcela deste caldo será destinada à produção de açúcar e qual parcela será destinada para a produção de álcool é decisão da usina, para atender ao seu mix de produção. Portanto, para o processo de difusão, somente a eficiência total da extração deverá ser informada.

A Tabela 4.1 apresenta uma comparação entre os sistemas de extração por moagem e por difusão, segundo diversos parâmetros:

Tabela 4.1: Comparação entre as principais características da moagem e da difusão

	Moagem	Difusão
Bagaço gerado	Menos impurezas e fibras mais curtas	<ul style="list-style-type: none"> ¶ Contem mais impurezas ¶ Apresenta fibras mais longas
Eficiência da extração	Difícilmente excede 97,5%	Pode atingir 98,5%, após passagem por moenda adicional
Energia necessária	<ul style="list-style-type: none"> ¶ Maior consumo de energia elétrica ¶ Menor consumo de energia térmica de processo 	<ul style="list-style-type: none"> ¶ Menor consumo de energia elétrica ¶ Maior consumo de energia térmica de processo
Flexibilidade de operação	<ul style="list-style-type: none"> ¶ Facilidade para ampliações ¶ Exige mais operadores e controle operacional ¶ Pode ser utilizado by-pass em caso de paradas 	<ul style="list-style-type: none"> ¶ Fácil de operar (com instrumentação) ¶ Difícil para ampliações ¶ Paradas prolongadas e paradas com partidas frequentes devem ser evitadas
Capex – Investimento	Equivalente ao Difusor	Equivalente à Moenda

Fonte: (Dedini, 2011)

O difusor utiliza cerca de 3% da energia mecânica total necessária em um tandem convencional de moendas de seis ternos acionados por turbinas de simples estágio. Em uma espécie de cana com 12,5% de fibra, essa economia representa um ganho de aproximadamente 10 MW por cada 1.000 ton. de cana processada (Rocha 2010).

No entanto, o consumo de energia térmica é maior, dado o consumo de vapor no processo de difusão.

Somente para esclarecimento, sobre as etapas intermediárias entre a extração do caldo e a produção de açúcar e álcool:

¶ **Filtro**

O caldo obtido no processo de extração é passado por filtros, cujo objetivo é eliminar, através de processo de decantação, as partículas sólidas ainda presentes no mesmo. Este subproduto sólido é chamado de torta de filtro e traz consigo certa quantidade de açúcar, ou seja, constitui uma perda no processo.

¶ **Multijato**

A produção de açúcar é feita através da evaporação do caldo da cana, após passagem pelos filtros. O multijato é o equipamento utilizado para promover a formação de autovácuo nos evaporadores, formação esta necessária para realizar a evaporação em temperaturas mais baixas. Esses equipamentos utilizam a injeção de água para formação do autovácuo, e esta água acaba por arrastar alguma quantidade de açúcar neste processo (perda).

4.4 - Produção de açúcar e de álcool

4.4.1 Mix de produção da usina

Denomina-se mix de produção de uma usina a decisão da quantidade de ART total da cana que será destinada à produção de açúcar e aquela que será destinada à produção de álcool.

Igualmente a outros setores, o mix de produção no setor sucroalcooleiro é ditado pelo mercado, ou seja, a opção de se produzir mais açúcar ou mais álcool se dá a partir da demanda do mercado.

4.4.2 Produção de açúcar

Dois tipos de açúcar são considerados neste estudo: o açúcar branco e o açúcar VHP:

¶ **Açúcar branco:**

É o açúcar tradicional, utilizado na residência dos brasileiros e na produção industrial nacional de diferentes gêneros alimentícios.

¶ **Açúcar VHP:**

Tipo de açúcar que, por ser menos úmido que o açúcar branco, é ideal para a exportação, pois facilita o transporte. Toda sua produção é destinada ao mercado externo para o refino em outros países.

A partir dos dados fornecidos, a ferramenta irá calcular a partir das Equações (4.1) e (4.2) a quantidade de açúcar branco e açúcar VHP que poderá ser produzida (Romão Júnior, 2009):

$$P_{branco} = ART_{branco} / (50 \times 0,95 / POL_{branco}) \quad (4.1)$$

$$P_{VHP} = ART_{VHP} / (50 \times 0,95 / POL_{VHP}) \quad (4.2)$$

Onde:

P_{branco}	- Produção de açúcar branco [sacas];
ART_{branco}	- Parcela de ART destinada a produção de açúcar branco [t];
POL_{branco}	- Polarização do açúcar branco [%];
P_{VHP}	- Produção de açúcar VHP [sacas];
ART_{VHP}	- Parcela de ART destinada a produção de açúcar VHP [t];
POL_{VHP}	- Polarização do açúcar VHP [%].

Uma saca equivale a 50kg de açúcar.

4.4.3 Produção de álcool

Dois tipos de álcool são considerados neste estudo: o álcool hidratado e o álcool anidro. A distinção entre esses dois tipos de álcool se dá em sua concentração alcóolica e no uso final de cada um, e pode ser conferida a seguir:

¶ **Álcool hidratado:**

Possui concentração alcóolica mais baixa, entre 92,6% e 93,8%, em peso (ANP, 2002). É utilizado na indústria alimentícia, farmacêutica, de cosméticos, industrial e como combustível.

¶ **Álcool anidro:**

É obtido a partir do processo de desidratação do álcool hidratado. Possui concentração alcóolica mais elevada, de no mínimo 99,3%, em peso (ANP, 2002). É utilizado em aplicações industriais como reativo e solvente, e também como combustível.

A seguir é apresentado como são calculadas as quantidades produzidas de álcool hidratado e álcool anidro.

As Equações (4.3) e (4.4) calculam os rendimentos teóricos da produção de álcool hidratado e anidro (Romão Júnior, 2009):

$$Rt_{Ahi} = Re \cdot \left[\left(1/D_{Aab} \right) + \left(1/TA_{Ahi}/100 \right) - 1 \right] \quad (4.3)$$

$$Rt_{Aan} = Re \cdot \left[\left(1/D_{Aab} \right) + \left(1/TA_{Aan}/100 \right) - 1 \right] \quad (4.4)$$

Onde:

Re	- Rendimento estequiométrico do álcool [kg/kg _{ART}] (valor fixo e fornecido pela ferramenta)
D_{Aab}	- Densidade do álcool absoluto [kg/l];
Rt_{Ahi}	- Rendimento teórico do álcool hidratado [l/kg _{ART}];
TA_{Aan}	- Teor alcoólico do álcool anidro [% peso];
Rt_{Aan}	- Rendimento teórico do álcool anidro [l/kg _{ART}];
TA_{Ahi}	- Teor alcóolico do álcool hidratado [% peso].

Uma vez calculados os valores para os rendimentos teóricos, os rendimentos globais da produção de álcool hidratado e álcool anidro são obtidos através das Equações (4.5) e (4.6).

$$Rg_{Ahi} = (Rt_{Ahi} \cdot Rp_{Ferm} \cdot R_{Dest}) / 10.000 \quad (4.5)$$

$$Rg_{Aan} = (Rt_{Aan} \cdot Rp_{Ferm} \cdot R_{Dest}) / 10.000 \quad (4.6)$$

Onde:

Rp_{Ferm}	- Rendimento prático da fermentação [%];
R_{Dest}	- Rendimento da destilaria [%];
Rg_{Ahi}	- Rendimento global de álcool hidratado [l/kg _{ART}];
Rg_{Aan}	- Rendimento global de álcool anidro [l/kg _{ART}].

Desta forma, as produções reais de álcool hidratado e álcool anidro são calculadas a partir das Equações (4.7) e (4.8).

$$PAH [l] = ART_{Ahi} \cdot Rg_{Ahi} \quad (4.7)$$

$$PAA [l] = ART_{Aan} \cdot Rg_{Aan} \quad (4.8)$$

Onde:

- | | |
|-------------|--|
| PAH | - Produção de álcool hidratado [l]; |
| ART_{Ahi} | - Parcela de ART destinada a produção de álcool hidratado [t]; |
| PAA | - Produção de álcool anidro [l], |
| ART_{Aan} | - Parcela de ART destinada a produção de álcool anidro [t]. |

5 - Geração de energia na usina

5.1 - Os combustíveis: bagaço e palha

5.1.1 O bagaço da cana

O bagaço é a biomassa residual do processamento da cana-de-açúcar.

Na indústria sucroalcooleira brasileira, o bagaço consiste na principal forma de geração de energia elétrica. Ele é queimado em caldeiras de geração de vapor, vapor este que alimenta os geradores que fornecem a energia elétrica necessária para o processo de produção de açúcar e álcool.

A quantidade de bagaço que estará disponível após a extração depende das propriedades da cana-de-açúcar e do próprio bagaço. A ferramenta calcula esta quantidade, utilizando a Equação (5.1) (Fiomari, 2004):

$$\text{Bagaço na cana [\%]} = \left(\frac{\% \text{ de fibra da cana}}{\% \text{ de fibra do bagaço}} \right) \quad (5.1)$$

Onde as percentagens estão expressas em percentagem mássica do total de fibras na cana e de fibras no bagaço. A percentagem mássica de fibra no bagaço será sempre superior à percentagem mássica de fibra na cana, uma vez que o bagaço é a cana após extração do caldo.

Assim, a quantidade total de bagaço disponível é calculada a partir da Equação (5.2):

$$\text{Bagaço disponível [t]} = \text{Safra [t]} \times \text{Bagaço na cana [\%]} \quad (5.2)$$

O poder calorífico interno (PCI) do bagaço pode ser calculado através da Equação (5.3) (UNICA, 2008):

$$PCI_{\text{bagaço}} [kJ/kg] = (4250 - 48.5w - 12s) \times 4,19 \quad (5.3)$$

Onde,

w - umidade do bagaço [%], informada pelo usuário;

s - teor de açúcar do bagaço [%].

A umidade do bagaço interfere diretamente no rendimento da combustão, pois com menor umidade ocorrerá uma queima mais rápida do combustível (Pellegrini, 2002). Quanto maior a umidade do bagaço, menor o seu PCI, ou seja, menor o seu potencial de geração de energia.

As caldeiras tradicionais em geral são projetadas para queimar o bagaço com umidade de aproximadamente 50% de umidade. Se a umidade for superior a 52% já ocorrerão problemas, pois o combustível não irá secar e entrar em combustão (Ferreira, 2011).

5.1.2 A palha

Durante muito tempo, a palha da cana-de-açúcar não foi aproveitada como combustível para geração de energia, sendo esta queimada nos campos antes do transporte da cana para as usinas.

A colheita mecanizada permitiu o fornecimento de palha para estas usinas, aumentando o potencial de geração de energia elétrica das mesmas. As usinas sucroalcooleiras, que sempre foram autossuficientes em energia, hoje tem a possibilidade de exportar a energia excedente gerada para a rede elétrica nacional.

Neste estudo, o PCI utilizado para a palha foi de 3.100 kcal/kg (13.000 kJ/kg), com uma umidade de 15% (Paoliello, 2006).

5.2- Produção/ consumo de energia

Embora as usinas sucroalcooleiras utilizem como fonte energética primária a biomassa residual do processamento da cana-de-açúcar, tornando-as praticamente autossuficientes em energia, historicamente o seu processo nunca foi eficiente do ponto de vista energético, pois o potencial energético era muito superior às necessidades do processo produtivo, e a estrutura energética dessas usinas sucroalcooleiras era deliberadamente estruturada para eliminar integralmente o resíduo (Corrêa Neto *et al.*, 2002), tanto o bagaço quanto a palha. Portanto, no Brasil, nas décadas de 80/90, iniciou-se uma discussão sobre a conveniência de se promover um melhor aproveitamento do potencial econômico da biomassa residual, transformando o seu potencial energético em energia elétrica.

Em paralelo, a transformação estrutural do setor elétrico brasileiro, iniciada nos meados da década de 90, vem tornando o setor cada vez mais descentralizado, com maior espaço para a produção de eletricidade em pequena escala/ média escala.

Este novo panorama deu oportunidade ao setor sucroalcooleiro de comercializar o seu excedente de produção de energia elétrica para a rede nacional, fato que se intensificou de forma expressiva após o início da utilização da palha para a geração de energia, dado o seu alto potencial energético, quando comparado com o bagaço.

A energia elétrica é gerada queimando-se combustível, a biomassa residual, em caldeiras geradoras de vapor, vapor este que aciona um turbogerador, que irá produzir energia elétrica para o funcionamento da usina e para possível comercialização e turboacionadores, que geram a potência mecânica necessária para o acionamento dos equipamentos utilizados na produção de açúcar e álcool. Após passagem pelo turbogerador e turboacionadores, o vapor rejeitado é utilizado para atender os requisitos térmicos do processo de produção. A Figura 5.1 apresenta um fluxograma esquemático do ciclo de geração de energia considerado neste trabalho.

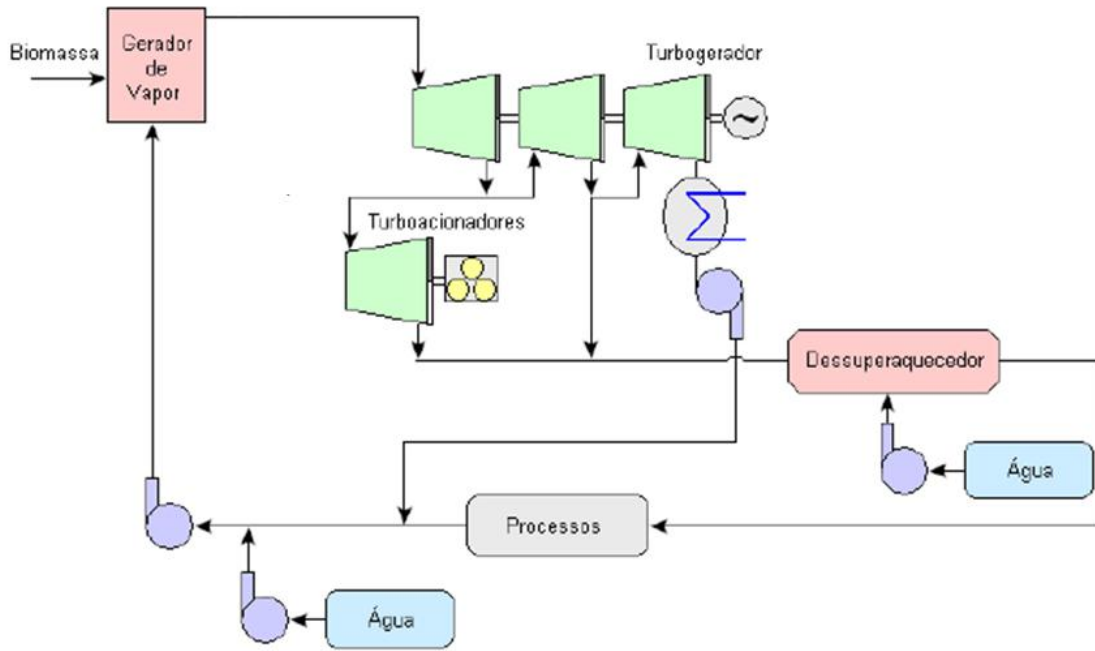


Figura 5.1: Fluxograma esquemático resumido do ciclo de geração de energia (elétrica e mecânica) em uma usina sucroalcooleira
(Fonte: Romão Júnior, 2009)

As Equações (5.4) e (5.5) calculam a quantidade de vapor produzido na caldeira, por bagaço e por palha, respectivamente. A quantidade total de vapor produzida é então calculada pela Equação (5.6) (Romão Júnior, 2009):

$$Vapor_{bagaço} = \frac{\eta_{Cald} \cdot PCI_{bagaço}}{(h_{Vger} - h_{Aal})} \quad (5.4)$$

$$Vapor_{palha} = \frac{\eta_{Cald} \cdot PCI_{palha}}{(h_{Vger} - h_{Aal})} \quad (5.5)$$

$$Vapor_{total} [t] = (Vapor_{bagaço} \cdot Bag_{Disp}) + (Vapor_{palha} \cdot Palha_{Disp}) \quad (5.6)$$

Onde:

η_{Cald}	- Rendimento da caldeira [%];
h_{Vger}	- Entalpia do vapor gerado [kJ/kg];
h_{Aal}	- Entalpia da água de alimentação [kJ/kg];
$Vapor_{bagaço}$	- Vapor produzido através da queima de bagaço [kg _{vapor} /kg _{bagaço}];
PCI_{Bag}	- Poder calorífico interno do bagaço [kJ/kg _{bagaço}];
$Vapor_{palha}$	- Vapor produzido através da queima de palha [kg _{vapor} /kg _{palha}];
PCI_{Palha}	- Poder calorífico interno da palha [kJ/kg _{palha}];
$Vapor_{total}$	- Vapor total produzido na usina [kg _{vapor}];
Bag_{Disp}	- Quantidade de bagaço disponível para queima [t];
$Palha_{Disp}$	- Quantidade de palha disponível para queima [t].

Do total de vapor gerado, parte é destinada aos turboacionadores e a outra parte para ao turbogerador. Essas quantidades são calculadas através das Equações (5.7) e (5.8):

$$V_{turboacionadores} = (CV_{processo} \cdot Safra) / 1000 \quad (5.7)$$

$$V_{turbogerador} = Vapor_{gerado} - V_{turboacionadores} \quad (5.8)$$

Onde:

$V_{turboacionadores}$	- Vapor destinado aos turboacionadores [t];
$CV_{processo}$	- Consumo de vapor no processo [kg/t _{cana}];
$V_{turbogerador}$	- Vapor destinado ao turbogerador [t].

A partir dos resultados obtidos com as equações acima é possível encontrar a geração de energia através do turbogerador e dos turboacionadores e total, calculadas através das Equações (5.9), (5.10) e (5.11), respectivamente:

$$G_{turbogerador} = \left(V_{turbogerador} / C_{turbogerador} \right) \times 1000 \quad (5.9)$$

$$G_{turboacionadores} = \left(V_{turboacionadores} / C_{turboacionadores} \right) \times 1000 \quad (5.10)$$

$$G_{total} = G_{turbogerador} + G_{turboacionadores} \quad (5.11)$$

Onde:

- $G_{turbogerador}$ - Geração de energia pelo turbogerador [MW];
- $G_{turboacionadores}$ - Geração de energia pelos turboacionadores [MW];
- G_{total} - Geração de energia total na usina [MW];
- $C_{turbogerador}$ - Consumo específico de vapor pelo turbogerador [$\text{kg}_{\text{vapor}}/\text{kW}$];
- $C_{turboacionadores}$ - Consumo específico de vapor pelos turboacionadores [$\text{kg}_{\text{vapor}}/\text{kW}$].

Enfim, conhecendo-se o consumo específico de energia na usina, em $\text{kWh}/t_{\text{cana}}$, é possível calcular o consumo interno total de energia na usina e a energia excedente disponível que poderá ser comercializada com a rede externa. Esses valores são calculados pelas Equações (5.12) e (5.13), respectivamente.

$$C_{interno} = (Safra \times C_{específico}) \times 1000 \quad (5.12)$$

$$E_{excedente} = G_{total} - C_{interno} \quad (5.13)$$

Onde:

- | | |
|------------------|--|
| $C_{interno}$ | - Consumo interno de energia na usina [MWh]; |
| $C_{específico}$ | - Consumo específico de energia na usina [kWh/t _{cana}]; |
| $E_{excedente}$ | - Energia excedente disponível para comercialização [MWh]. |

6 - A ferramenta Quantifica

A ferramenta Quantifica foi desenvolvida na plataforma Microsoft Excel e foi dividida em duas partes principais: a primeira parte corresponde à entrada de dados e a segunda a apresentação dos resultados.

A Quantifica é composta de diversas abas que são resumidamente apresentadas a seguir:

1ª parte: Inserção de dados

¶ **Aba 1: Safra, lavagem e extração**

Nesta aba o usuário irá fornecer os parâmetros necessários para a caracterização da safra anual e as propriedades da cana-de-açúcar a qual a usina terá acesso, a colheita, a lavagem da cana e a extração do caldo da cana.

¶ **Aba 2: Dados da produção**

Nesta aba o usuário irá fornecer os parâmetros necessários para a caracterização da produção: o mix de produção da usina, a produção/ consumo de energia para a produção, as características da fábrica de açúcar e os dados da destilaria de álcool.

¶ **Aba 3: Dados financeiros**

Nesta aba o usuário irá fornecer os parâmetros financeiros relacionados à construção e operação da usina: investimento inicial necessário para a construção, inflação e taxa de juros, custos operacionais de produção e preços de venda dos produtos finais da usina.

2ª parte: Apresentação de resultados

¶ **Aba 4: Resultados da produção**

Nesta aba são apresentados os resultados referentes à produção: qual a quantidade produzida de cada um dos produtos finais da usina: açúcar branco, açúcar VHP, álcool hidratado, álcool anidro e vinhaça, assim como o mix final de produção da usina.

¶ **Aba 5: Energia excedente**

Nesta aba são apresentados os resultados referentes à geração de energia elétrica: disponibilidade de combustível (bagaço + palha) que será enviado para a queima nas caldeiras, o potencial energético do combustível, o consumo de energia da usina, e a energia excedente que poderá ser comercializada.

¶ **Aba 6: Resultados financeiros**

Nesta aba são apresentados os resultados financeiros da usina: resultados anuais da usina e tempo necessário para o retorno do investimento inicial realizado.

Além disso, a ferramenta conta com duas abas complementares:

1. Apresentação de diagrama com os resultados de balanço de ART ao longo da cadeia de produção de açúcar e álcool, considerando o tipo de extração de caldo definido pelo usuário. Isto é apresentado no apêndice A deste trabalho.
2. Apresentação do fluxo de caixa da empresa, por um período de 2 anos. Isto é apresentado no Apêndice B deste trabalho.

A inserção de dados na ferramenta funciona segundo o código de cores da Figura 6.1.


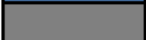

Legenda	
	Variáveis (a critério do usuário)
	Dados fornecidos (não modificar)
	Dados calculados

Figura 6.1: Código de cores utilizado para inserção de dados na ferramenta

6.1 - Aba 1: Safra, lavagem e extração

6.1.1 Dados da safra e propriedades da cana-de-açúcar

Na primeira etapa de entrada de dados da ferramenta, o usuário deve definir os parâmetros referentes à safra e às propriedades da cana-de-açúcar desta safra.

A Figura 6.2 mostra o quadro de entrada de dados da safra e propriedades da cana-de-açúcar na ferramenta.



Safra e propriedades da cana-de-açúcar

Safra		
Safra	[t/ano]	2.000.000

Propriedades da cana-de-açúcar		
Palha na cana inteira	[%]	13,0
Açúcares redutores na cana	[%]	0,8
Polarização da cana	[%]	13,2
ART da cana	[%]	14,6
Fibra da cana	[%]	12,0

Figura 6.2: Quadro de entrada de dados da safra e propriedades da cana-de-açúcar

A safra representa a quantidade de cana-de-açúcar que estará disponível para a produção de açúcar e álcool na usina, expressa em toneladas por ano, ou seja, a quantidade de cana plantada e colhida ou diretamente comprada pela usina. No caso onde a usina compra a cana a ser utilizada, considera-se que não houve qualquer processo de lavagem ou separação de impurezas antes da chegada desta na usina.

Posteriormente, o usuário deve definir quais são as propriedades da cana a ser processada, ou seja, caracterizar a sua composição fisiológica e química.

Os dados que o usuário deve preencher são:

¶ **Percentagem de palha na cana plantada [%]:**

Percentagem de folhas, verdes e secas, e ponteiros, na composição total da cana, em massa.

¶ **Percentagem de fibra da cana [%]:**

Percentagem de fibras na composição total da cana, em massa. Como se verá adiante, este parâmetro influencia diretamente na quantidade de bagaço que estará disponível para geração de energia para a usina.

¶ **Açúcares redutores na cana [%]:**

Ver seção 2.

¶ **Polarização da cana [%]:**

Ver seção 2.

A partir do teor de açúcares redutores (glicose e frutose) e da polarização (sacarose) na cana, fornecidos pelo usuário, a ferramenta irá calcular a quantidade de açúcar redutor total (ART) da cana, que é, de fato, a quantidade de açúcar total presente na cana.

A Figura 6.3 mostra um resumo dos parâmetros que influenciam a quantidade ART na cana produzida.

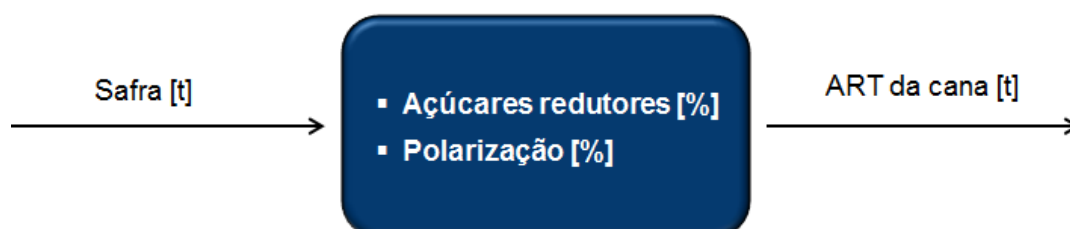



Figura 6.3: Parâmetros para definição da quantidade de ART na cana
(Elaboração própria)

6.1.2 Colheita

Após a definição da disponibilidade e das propriedades físico-químicas da cana-de-açúcar, o usuário irá caracterizar o modo como a cana foi colhida. A Figura 6.4 mostra o quadro de entrada de dados do de caracterização da colheita.



Colheita

Mecanização da colheita		
Mecanizada	[%]	70
Manual	[%]	30

Recuperação da palha		
% de palha deixada no campo	[%]	30

Figura 6.4: Quadro de entrada de dados de colheita

O usuário deverá definir qual a percentagem da colheita é feita de forma mecanizada e qual percentagem é feita de forma manual

Se alguma parte da colheita for feita de forma mecanizada, o usuário deverá definir qual a percentagem de palha que deverá ser deixada no campo, considerando-se que uma parcela deve obrigatoriamente ser deixada no plantio, para a proteção do solo. Segundo a fabricante de colhedoras Valtra, essa percentagem é da ordem de 30% (Valtra, 2011).

6.1.3 A lavagem da cana-de-açúcar

Uma vez fornecidos os dados sobre o tipo e eficiência da colheita, o usuário deve definir os parâmetros da lavagem da cana-de-açúcar. A Figura 6.5 mostra o quadro de entrada de dados para caracterização da lavagem da cana.

Lavagem da cana-de-açúcar		
Lavagem da cana		
Tipo de lavagem	A seco	
Perda de ART na lavagem	[%]	-
Eficiência da lavagem a seco	[%]	63
Taxa de utilização da lavagem a seco	[%]	65

Figura 6.5: Quadro de entrada de dados da lavagem da cana

O usuário deve definir se a lavagem é feita da forma tradicional, ou seja, com água, ou se é utilizado um sistema de lavagem a seco, como explicado na seção 4.2.

Para inserção na ferramenta, deve-se considerar que:

- ¶ A perda de ART durante a lavagem é medida em percentagem do peso total de ART que entra na usina.
- ¶ A eficiência da lavagem a seco corresponde à percentagem da palha que a lavadora a seco consegue separar do colmo antes do processo de extração. Este valor é da ordem de 63% (Romão Júnior, 2009). Segundo a Dedini, fabricante brasileira de moendas e difusores, a separação da palha melhora a extração do caldo. A palha separada tem alto potencial energético, e pode utilizada para queima na caldeira.
- ¶ A taxa de utilização da lavagem a seco corresponde à percentagem do tempo de funcionamento da usina que a lavagem a seco estará em funcionamento

6.1.4 A extração do caldo da cana:

A Figura 6.6 mostra o quadro de entrada de dados para caracterização da extração do caldo da cana.

Extração do caldo da cana		
Tipo e eficiência da extração		
Tipo de extração	Moagem	
Eficiência da extração	[%]	96,0
Utilização		
Dias de extração	[dias/ano]	210,0
Horas de extração	[h/ano]	5.040,0
Extração horária	[t/h]	396,8

Figura 6.6: Quadro de entrada de dados de extração do caldo

O usuário deverá definir se a extração do caldo será realizada através de processo de moagem ou de difusão. Em seguida, deverá especificar qual a eficiência da extração. Segundo a Dedini, a eficiência da extração no processo de moagem pode atingir um máximo de 97,5%, enquanto no processo de difusão este valor pode subir até 98,5%.

Na ferramenta de quantificação aqui descrita, o processo de extração por moagem estará completamente definido uma vez informada a eficiência total da extração, que definirá quantidade de ART perdida no processo.

A utilização corresponde ao número de dias de funcionamento da usina, ou seja, o número de dias em que haverá extração do caldo da cana.

6.1.5 Os combustíveis energéticos: o bagaço e a palha

As últimas informações que o usuário fornecerá nesta primeira aba da ferramenta são as propriedades do bagaço e da palha da cana-de-açúcar, que representam os combustíveis utilizados para geração de energia elétrica e mecânica nas usinas sucroalcooleiras.

A Figura 6.7 mostra o quadro para entrada dos dados referentes às propriedades do bagaço e da palha da cana-de-açúcar.

Combustível energético: o bagaço e a palha		
Propriedades do bagaço		
Fibra do bagaço	[%]	46,2
Bagaço na cana produzida	[%]	26,0
Bagaço disponível	[t]	520.043
Umidade [%]	[%]	50,0
Teor de açúcar [%]	[%]	2,3
PCI	[kcal/kg]	1.798
PCI	[MJ/kg]	7,5
Propriedades da palha		
PCI	[kcal/kg]	3.100,0
PCI	[MJ/kg]	13,0

Figura 6.7: Quadro de entrada das propriedades do bagaço e da palha

A percentagem de bagaço e a quantidade total, em toneladas, de bagaço disponível para queima são calculadas a partir das Equações (4.9) e (4.10), apresentadas na seção 4.5.1.1.

O PCI do bagaço é calculado a partir da Equação (4.11), também apresentada na seção acima mencionada.

A Figura 6.8 mostra um resumo dos parâmetros que influenciam a quantidade de bagaço disponível para a queima nas caldeiras da usina.

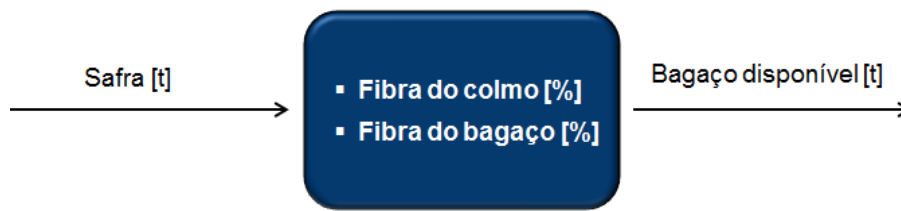


Figura 6.8: Parâmetros para definição da quantidade de bagaço disponível
(*Elaboração própria*)

O PCI utilizado para a palha foi de 3.100 kcal/kg (13.000 kJ/kg), com uma umidade de 15% (Paoliello, 2006).

A quantidade de palha que estará disponível para queima na caldeira depende de alguns parâmetros, os quais são apresentados na Figura 6.9.

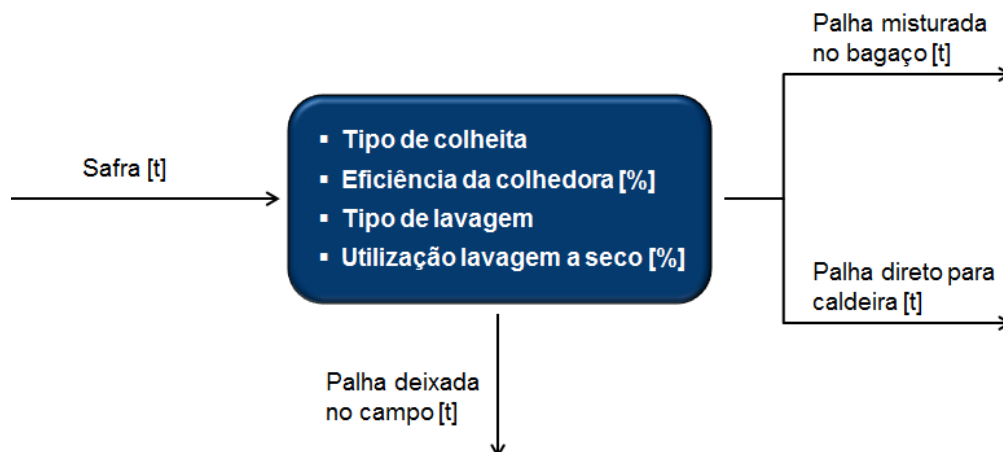


Figura 6.9: Parâmetros para o cálculo da quantidade de palha disponível
(*Elaboração própria*)

6.2 - Aba 2: Dados da produção

Nesta segunda etapa de entrada de dados, o usuário irá definir quais serão os parâmetros de produção da usina a ser analisada, como o mix de produção da usina, os dados sobre geração/ consumo de energia/ vapor, e os dados da fábrica de açúcar e a destilaria de álcool.

Como mencionado anteriormente, os cálculos de produção de açúcar e álcool são baseados no balanço de massa de ART ao longo da cadeia de produção. O balanço de massa de ART é calculado conforme mostra a Equação (6.1) a seguir (Dal Bem *et al.*, 2006):

$$ART_{total} = ART_{açúcar} + ART_{álcool} + perdas \quad (6.1)$$

6.2.1 O mix de produção da usina

A Figura 6.10 mostra o quadro de entrada de dados referentes ao mix de produção:

Mix de produção da usina		
Açúcar	[%]	70
Álcool	[%]	30

Figura 6.10: Quadro de entrada do mix de produção da usina

Uma usina pode optar por produzir:

- ¶ Álcool, unicamente
- ¶ Álcool e açúcar

A opção de se produzir unicamente açúcar não é considerada na ferramenta desenvolvida. Como se viu anteriormente, devido a razões técnico-econômicas, a quantidade máxima de açúcar que pode ser produzida em usinas sucroalcooleiras tradicionais é limitada pelo fator de recuperação da fábrica de açúcar. Portanto, na etapa final do processo de produção de açúcar, há uma certa quantidade de ART de $[1 - \text{fator de recuperação (FR)}]\%$ que não pode ser aproveitada para tal, estando disponível para algum outro fim. Esta parcela é então direcionada para a produção de álcool.

Isso pode ser entendido através do diagrama da Figura 6.11 e do exemplo numérico da Figura 6.12, supondo um mix de produção de 70% de açúcar e 30% de álcool e um fator de recuperação de 80%.

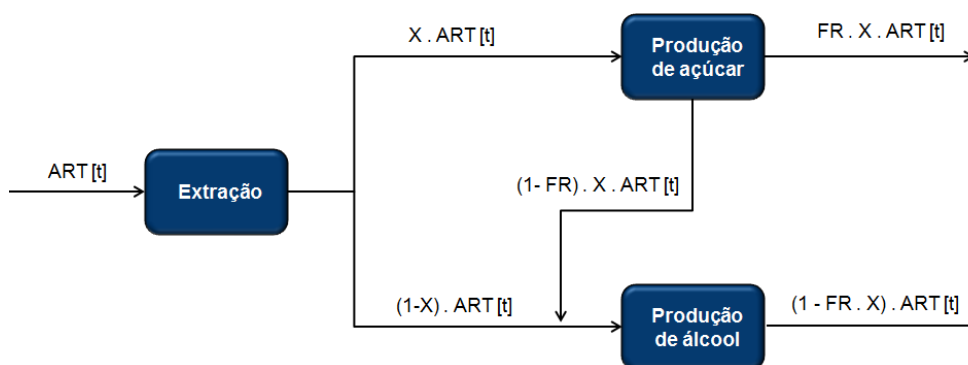


Figura 6.11: Diagrama resumido do processo de produção: balanço de ART
(Elaboração própria)

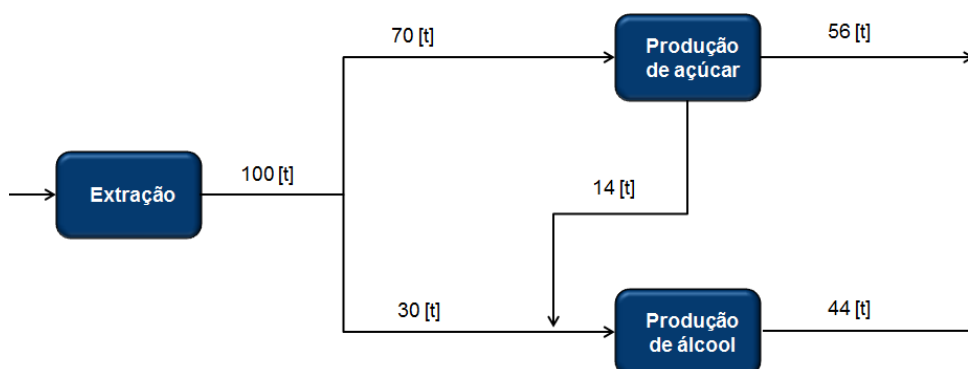


Figura 6.12: Diagrama resumido do processo de produção: balanço de ART, exemplo numérico
(Elaboração própria)

6.2.2 A produção/ consumo de energia na usina

Nesta etapa, o usuário deverá fornecer as informações necessárias para que a ferramenta efetue os seguintes cálculos relacionados à produção e consumo de vapor e energia elétrica na usina. A Figura 6.13 mostra o quadro de entrada dos dados na ferramenta:

Produção/ consumo de energia		
Consumo/ geração de vapor		
Rendimento da caldeira	[%]	86.0
Entalpia da água de alimentação	[kJ/kg]	440.0
Entalpia do vapor gerado	[kJ/kg]	3,483.0
Consumo de vapor no processo	[kg/t _{cana}]	360.0
Consumo específico do turboacionador	[Kg _{vapor} /kW]	5.0
Consumo específico do turbogerador	[Kg _{vapor} /kW]	3.0
Consumo específico da usina	[kWh/t _{cana}]	40.0

Figura 6.13: Quadro de entrada de dados relacionados à produção/ consumo de energia

O consumo de vapor no processo representa a quantidade de vapor que é necessário no processo de produção, por tonelada de cana processada. O consumo específico de vapor pelos turboacionadores representa a quantidade de vapor necessária para a geração de 1 kW de potência pelos turboacionadores. O consumo específico de vapor do turbogerador representa a quantidade de vapor necessária para a geração de 1 kW de potência pelo turbogerador. O consumo específico da usina representa a quantidade de energia elétrica necessária, por tonelada de cana processada, para a operação da usina.

A partir dos dados fornecidos pelo usuário, a ferramenta irá utilizar as Equações (4.12) a (4.21) para o cálculo dos seguintes parâmetros:


- ¶ Potencial energético do combustível total disponível (bagaço + palha), em GJ;
- ¶ Produção total de vapor na caldeira, em toneladas;
- ¶ Energia elétrica gerada, em GWh/ano;

- ¶ Energia elétrica consumida para operação da usina, em GWh/ano;
- ¶ Energia excedente disponível para comercialização venda à rede elétrica, em GWh/ano.

Estes resultados são apresentados na Aba 5 da ferramenta, descrita mais adiante neste trabalho.

6.2.3 A produção de açúcar

A Figura 6.14 mostra o quadro de entrada de dados de parâmetros da produção de açúcar.



Produção de açúcar

Propriedades do açúcar		
Polarização açúcar branco	[%]	99,7
Polarização açúcar VHP	[%]	99,3

Perfil de produção: tipos de açúcar		
Branco	[%]	100,0
VHP	[%]	-

Perdas e eficiências do processo de fabricação		
Perda de ART nos filtros	[%]	1,5
Perda de ART no multijato	[%]	1,5
Fator de recuperação da fábrica (FR)	[%]	75,0

OBS: As perdas são medidas em porcentagem, em relação ao total de açúcar que entra no processo

Figura 6.14: Quadro de entrada de dados sobre a produção de açúcar

Assim como na cana, a polarização dos açúcares define a percentagem de sacarose nos mesmos, em peso. A polarização do açúcar de consumo direto deve ser sempre superior a 99,7%. Açúcares com teores de sacarose inferior a 99,5% são basicamente utilizados como matéria-prima para posterior refino e nunca são consumidos diretamente, exceto nos casos de açúcar mascavo, rapadura, etc (Oliveira *et al.*, 2007).

O usuário deverá definir o mix de produção entre os dois tipos de açúcares considerados.

O fator de recuperação (FR) da fábrica de açúcar, em percentagem, corresponde à quantidade de ART que se deseja recuperar de açúcar, em relação a quantidade presente no caldo. Esse fator é limitado por questões técnico-econômicas, e varia entre 75% e 80% (Procknor, 2010).

A partir dos dados fornecidos, a ferramenta irá calcular a quantidade de açúcar branco e açúcar VHP produzido a partir das Equações (4.1) e (4.2) apresentadas na seção 4.4.2.

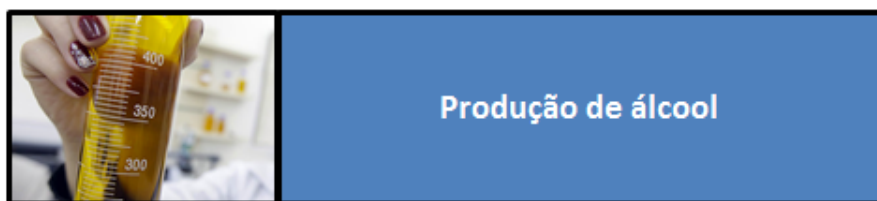
Os resultados da produção de açúcar são então apresentados na Aba 4 da ferramenta, que será descrita mais adiante.

6.2.4 A produção de álcool

A Figura 6.15 mostra o quadro de entrada de dados dos parâmetros para a produção de álcool.

O usuário deverá definir o mix de produção entre os dois tipos de álcool considerados. Visto que o álcool anidro é derivado do álcool hidratado, a percentagem escolhida para a produção de anidro corresponderá ao fator de conversão de álcool hidratado em anidro.

Para o cálculo das quantidades produzidas de álcool hidratado e anidro, a partir dos dados fornecidos pelo usuário, a ferramenta utiliza as Equações (4.3) a (4.8), apresentadas da seção 4.4.3.



Dados da destilaria		
Rendimento estequiométrico	kg/kg _{ART}	0,51
Densidade do álcool absoluto	kg/l	0,78
Teor alcoólico do álcool hidratado	% peso	93,80
Rendimento teórico - álcool hidratado	l/kg _{ART}	0,70
Teor alcoólico do álcool anidro	% peso	99,30
Rendimento teórico - álcool anidro	l/kg _{ART}	0,67
Rendimento prático da fermentação	%	90,41
Rendimento da destilação	%	99,84
Rendimento global - álcool hidratado	l/kg _{ART}	0,63
Rendimento global - álcool anidro	l/kg _{ART}	0,60

Perfil de produção: tipos de álcool		
Hidratado	[%]	50,0
Anidro	[%]	50,0

Figura 6.15: Quadro de entrada de dados sobre a produção de álcool

Adicionalmente aos resultados de produção de álcool hidratado e de álcool anidro, a ferramenta calcula também a quantidade de vinhaça que será produzida no processo.

A vinhaça, também chamada de vinhoto, é um subproduto resultante da destilação do vinho, que é produto da fermentação do caldo da cana no processo de produção de álcool hidratado. Quando jogada nos rios, constitui uma séria fonte de poluição; no entanto, pode ser aproveitada como fertilizante, pode ser utilizada na produção de biogás ou ainda como usada complemento para ração animal de alto teor proteico.

Para cada litro de álcool hidratado, produz-se 13 litros de vinhaça (Salomon 2007).

Os resultados da produção de álcool/ vinhaça são então apresentados na Aba 4 da ferramenta, que será descrita mais adiante.

6.3- Aba 3: Dados financeiros

Além de quantificar a produção da usina, um objetivo adicional da ferramenta desenvolvida é prover uma breve análise financeira sobre a operação da mesma. Portanto, na última etapa de inserção de dados, o usuário irá fornecer dados financeiros, que servirão para a construção de um fluxo de caixa, com receitas e custos de operação anuais da unidade de produção. A partir do fluxo de caixa, é então estimado tempo necessário para o retorno completo do investimento inicial realizado para a sua construção.

Para tal, o usuário deverá informar:

- ¶ Investimento inicial realizado para a construção da usina;
- ¶ Taxa de inflação média;
- ¶ Custos de produção dos produtos finais da usina;
- ¶ Preço de venda no mercado dos produtos finais da usina.

6.3.1 O investimento inicial e a taxa de inflação

O investimento inicial necessário corresponde à quantia que deverá ser desembolsada pelos investidores para a construção da usina sucroalcooleira.

A inflação corresponde ao aumento ao longo dos anos dos preços de venda dos produtos finais em questão: açúcar branco, açúcar VHP, álcool hidratado, álcool anidro, vinhaça e energia excedente. Neste estudo, foi considerado que a os custos de operação também aumentam anualmente, segundo a taxa de inflação.

A Figura 6.16 mostra o quadro de entrada do investimento inicial e da taxa de inflação, na ferramenta:


 <div>Investimento inicial e inflação</div>		
Investimento	[R\$]	198.000.000
Inflação	[% a.a.]	5,8

Figura 6.16: Quadro de entrada do investimento inicial e taxa de inflação

6.3.2 Custos de produção

Aqui o usuário irá preencher os valores para os custos de produção de cada um dos produtos finais da usina.

A Figura 6.17 mostra os dados a serem preenchidos pelo usuário.

Custos de produção		
Custos de produção		
Produção de açúcar branco	[R\$/t]	943,14
Produção de açúcar VHP	[R\$/t]	867,34
Produção de álcool hidratado	[R\$/m3]	1.327,60
Produção de álcool anidro	[R\$/m3]	1.413,54
Geração de eletricidade	[R\$/MWh]	35,70

Figura 6.17: Quadro de entrada dos custos de produção da usina

Um estudo anual realizado pela Universidade de São Paulo (USP), pela Escola Superior de Agricultura (EASLQ), pelo Programa de Educação Continuada em Economia e Gestão de

Empresas (PECEGE) e pela Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA) revelou que para a safra 2011/2012 de cana, os custos de produção no Brasil foram (PECEGE, 2012):

¶ **Açúcar branco:**

- Usinas do Centro-Sul tradicionais: R\$ 943,14/ tonelada
- Usinas do Centro-Sul em expansão: R\$ 898,54/ tonelada
- Usinas do Nordeste: R\$ 893,43/ tonelada

¶ **Açúcar VHP:**

- Usinas do Centro-Sul tradicionais: R\$ 738,70/ tonelada
- Usinas do Centro-Sul em expansão: R\$704,24/ tonelada
- Usinas do Nordeste: R\$ 871,47/ tonelada

¶ **Álcool hidratado:**

- Usinas do Centro-Sul tradicionais: R\$ 1327,60/ m³
- Usinas do Centro-Sul em expansão: R\$ 1289,63/ m³
- Usinas do Nordeste: R\$ 1347,91/ m³

¶ **Álcool anidro:**

- Usinas do Centro-Sul tradicionais: R\$ 1413,54/ m³
- Usinas do Centro-Sul em expansão: R\$ 1361,04/ m³
- Usinas do Nordeste: R\$ 1420,22/ m³

Nota 1: Centro-Sul tradicionais: SP e PR
Centro-Sul em expansão: GO, MG, MS e MT
Nordeste: AL, PB e PE

Nota 2: O custo de produção da vinhaça está incluído no custo de produção do álcool hidratado.

6.3.3 Preços de venda

Nesta última etapa, o usuário irá preencher os valores para os preços de venda dos produtos finais da usina.

A Figura 6.18 mostra um exemplo do quadro a ser preenchido pelo usuário.

Preços de venda		
Preços de venda		
Açúcar Branco	[R\$/saca]	57.6
Açúcar VHP	[R\$/saca]	48.8
Álcool Hidratado	[R\$/m ³]	1,265.0
Álcool Anidro	[R\$/m ³]	1,386.0
Vinhaça	[R\$/m ³]	6.0
Energia	[R\$/MWh]	120.0

Figura 6.18: Quadro de entrada dos preços de venda dos produtos finais da usina

Segundo o Ministério da Agricultura, a ESALQ e o Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (CEPEA), a média dos preços de venda de janeiro e fevereiro 2013 de cada um dos produtos finais das usinas sucroalcooleiras foram (Ministério da Agricultura, 2013):

¶ **Açúcar branco:**

- São Paulo: R\$ 48,43/saca
- Alagoas: R\$ 60,28/ saca
- Pernambuco: R\$ 58,98/ saca

¶ **Açúcar VHP:**

- São Paulo: R\$ 38,07/ saca

¶ **Álcool hidratado:**

- São Paulo: R\$ 1188,00/ m³
- Alagoas: R\$ 1297,00/ m³
- Pernambuco: R\$ 1317,00/ m³

¶ **Álcool anidro:**

- São Paulo: R\$ 1328,00/ m³
- Alagoas: R\$ 1576,00/ m³
- Pernambuco: R\$ 1611,00/ m³

O preço de venda da vinhaça é da ordem de R\$ 8,00 por litro (Hoppe *et al.*, 2009).

De posse de todos os valores fornecidos, a ferramenta irá calcular o fluxo de caixa anual da usina, levando em consideração o investimento inicial, a soma dos preços de venda de todos os produtos produzidos e os custos de produção de cada um deles. A partir do fluxo de caixa, a ferramenta o tempo necessário para retorno do investimento realizado.

Esses resultados são então apresentados na Aba 6, descrita mais a diante.

6.4- Aba 4: Resultados da produção

Esta aba apresenta ao usuário os resultados referentes a produção de açúcar e álcool:

¶ Quantidade de açúcar branco produzido

- Total, em sacas;
- Total, em kg;
- Por tonelada de cana, em kg/t.

¶ Quantidade de açúcar VHP produzido

- Total, em sacas;
- Total, em kg;

- Por tonelada de cana, em kg/t.
- ¶ Quantidade de álcool hidratado produzido
 - Total, em litros;
 - Por tonelada de cana, em l/t.
- ¶ Quantidade de álcool anidro produzido
 - Total, em litros;
 - Por tonelada de cana, em l/t.
- ¶ Quantidade de vinhaça produzida
 - Total, em litros;
 - Por tonelada de cana, em l/t.
- ¶ Mix de produção da usina, em %
 - Total, em litros;
 - Por tonelada de cana, em l/t.

Ao clicar no botão “Ver balanço de ART”, o usuário terá acesso a uma aba contendo o fluxo de massa de ART ao longo de todo o processo de produção. Ver Apêndice A.

As Figuras 6.19 e 6.20 apresentam imagens retiradas da ferramenta, com as apresentações dos resultados de produção de açúcar e álcool e do mix de produção da usina, respectivamente.

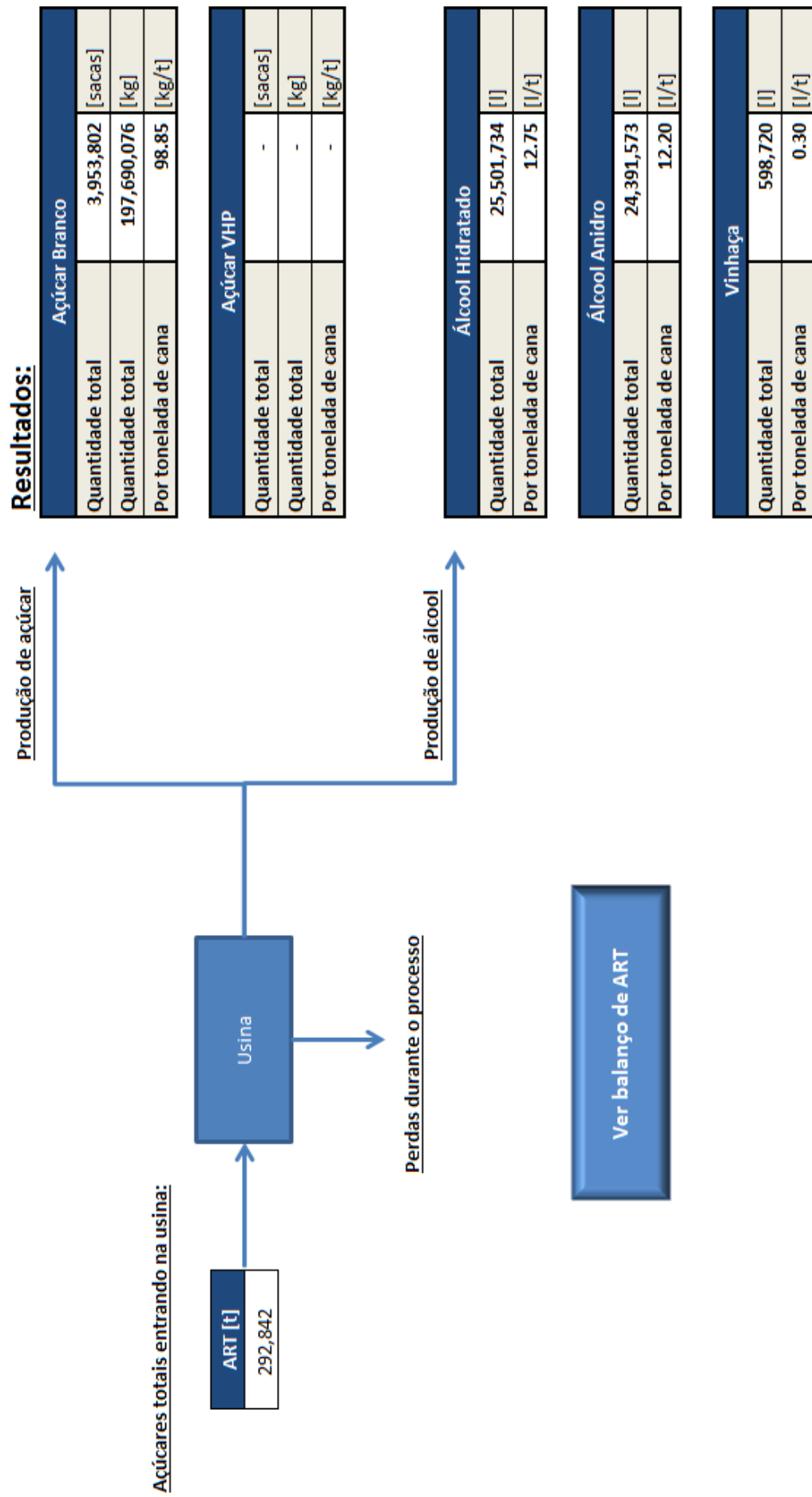


Figura 6.19: Apresentação de resultados – Produção de açúcar branco e VHP, álcool hidratado e anidro e vinhaça

Mix de produção:

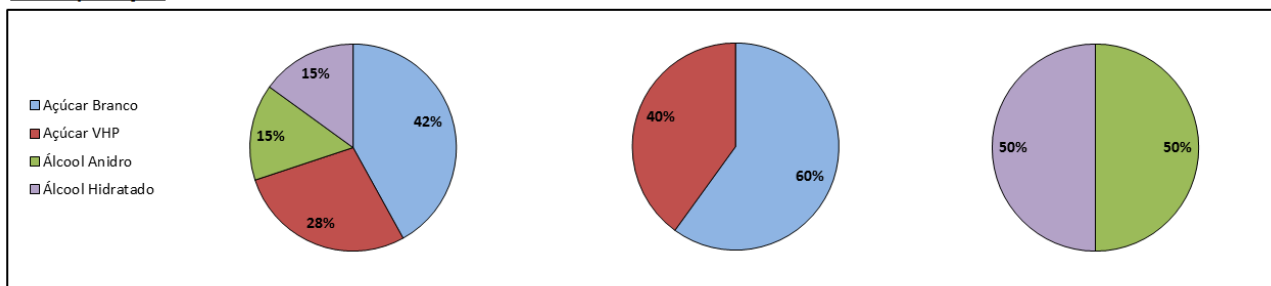


Figura 6.20: Apresentação de resultados – Mix de produção da usina

6.5- Aba 5: Energia excedente

Esta aba apresenta ao usuário os resultados referentes à produção e consumo de energia na usina, assim como a quantidade de energia elétrica excedente que estará disponível para comercialização. Os resultados apresentados incluem:

¶ Combustível

○ Palha

- Disponibilidade de palha, em toneladas;
- PCI da palha, em MJ/kg;
- Energia total da palha, em GJ;

○ Bagaço

- Disponibilidade de bagaço, em toneladas;
- PCI do bagaço, em MJ/kg;
- Energia total do bagaço, em GJ;

¶ Potencial total de geração de energia, em GJ;

¶ Produção total de vapor nas caldeiras, em toneladas;

¶ Energia total gerada anualmente, em GWh;

¶ Energia consumida pela usina, em GWh;

¶ Energia excedente disponível para comercialização, em GWh.

As Figuras 6.21, 6.22 e 6.23 a apresentam imagens retiradas da ferramenta, com as apresentações dos resultados de disponibilidade de palha, disponibilidade de bagaço e de geração, consumo e disponibilidade de energia excedente para comercialização, respectivamente.

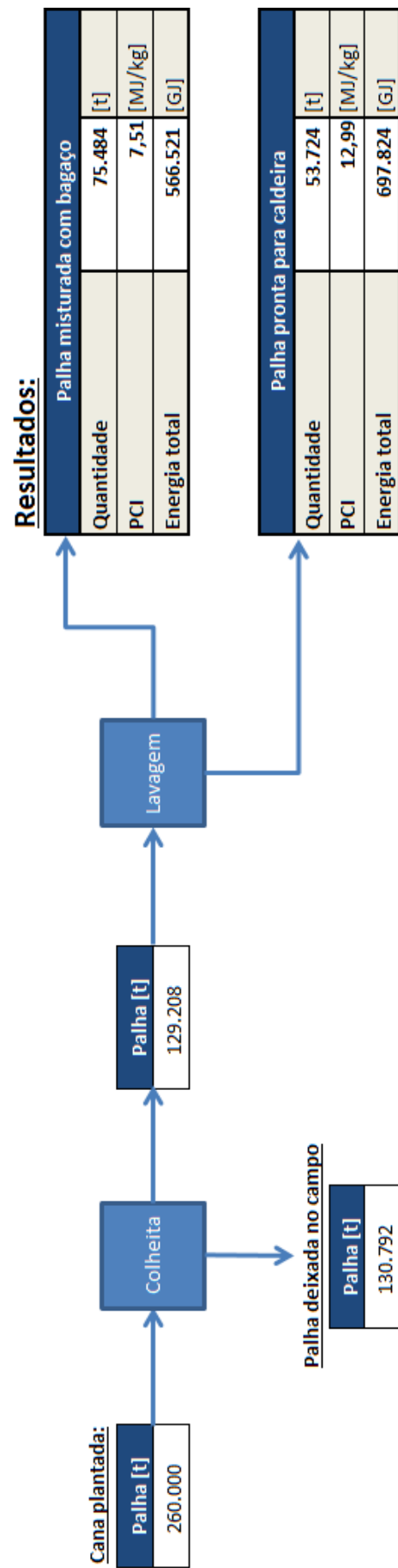


Figura 6.21: Apresentação de resultados – Disponibilidade de palha

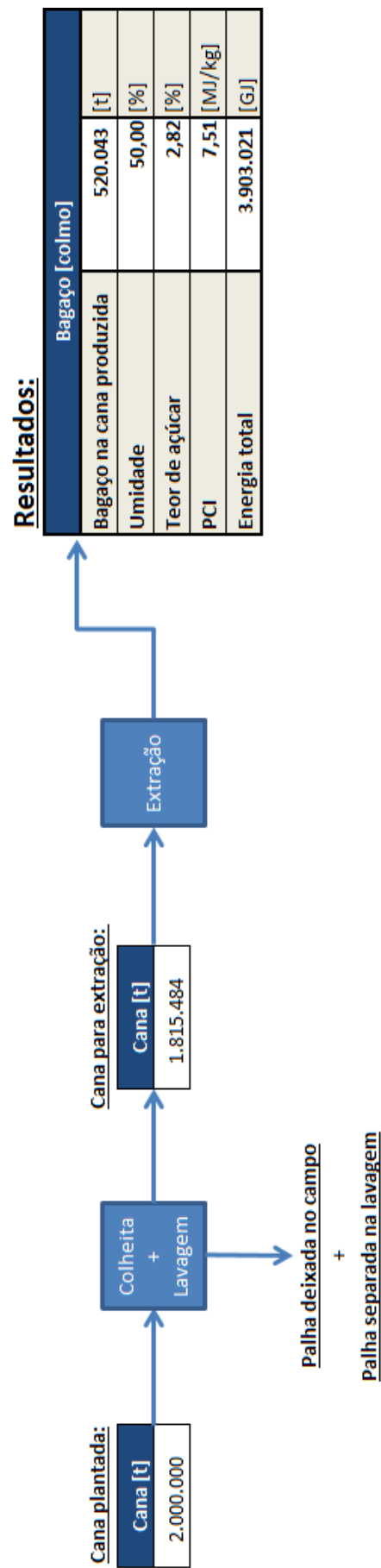


Figura 6.22: Apresentação de resultados – Disponibilidade de bagaço

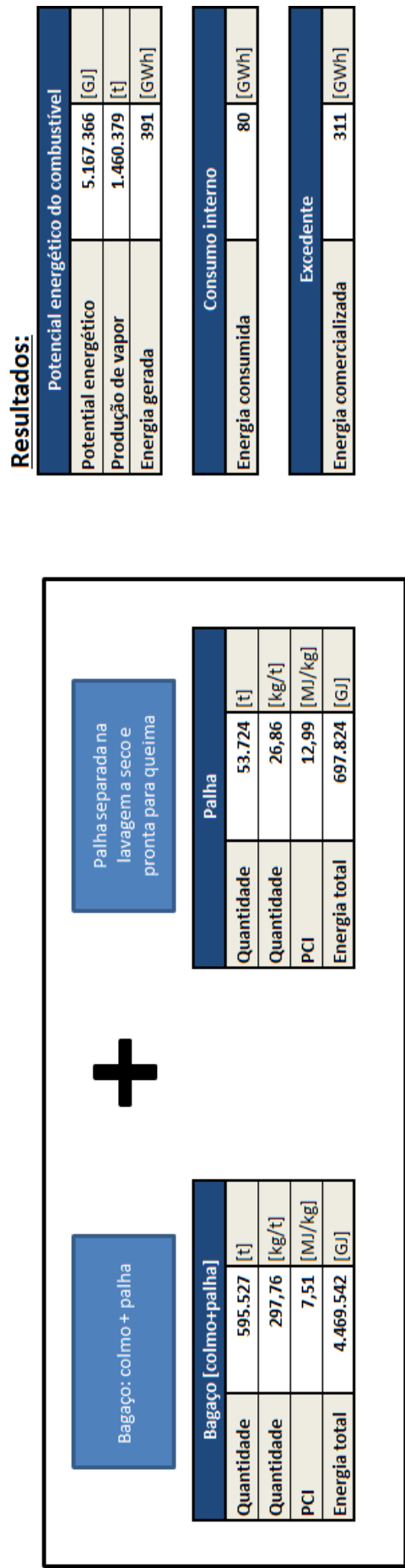


Figura 6.23: Apresentação de resultados – Geração, consumo e comercialização de energia

6.6 - Aba 6: Resultados financeiros

Esta aba apresenta ao usuário os resultados financeiros da usina, incluindo:

- ¶ Resultados anuais, segundo ano definido pelo usuário;
- ¶ Gráfico indicando o acúmulo de lucro ao longo dos anos, onde o usuário poderá verificar qual o tempo necessário para retorno do investimento.

Ao clicar no botão “Fluxo de caixa”, o usuário terá acesso a uma aba contendo o fluxo de caixa da usina ao longo de 12 anos. Ver Apêndice B.

As Figuras 6.24 e 6.25 apresentam imagens retiradas da ferramenta, com as apresentações dos resultados financeiros da usina.

Resultado anual		
Ano		3
Receitas	R\$	326.261.745,52
Açúcar Branco	R\$	214.338.737,54
Açúcar VHP	R\$	-
Álcool Hidratado	R\$	33.912.318,89
Álcool Anidro	R\$	36.258.448,88
Vinhaça	R\$	5.361,48
Venda de Energia	R\$	41.746.878,72
Custos	R\$	300.812.620,10
Açúcar Branco	R\$	208.704.766,60
Açúcar VHP	R\$	-
Álcool Hidratado	R\$	37.897.301,82
Álcool Anidro	R\$	38.593.951,68
Energia	R\$	15.616.600,00
Resultado anual	R\$	25.449.125,42

Fluxo de caixa completo

Figura 6.24: Apresentação de resultados – Resultados anuais

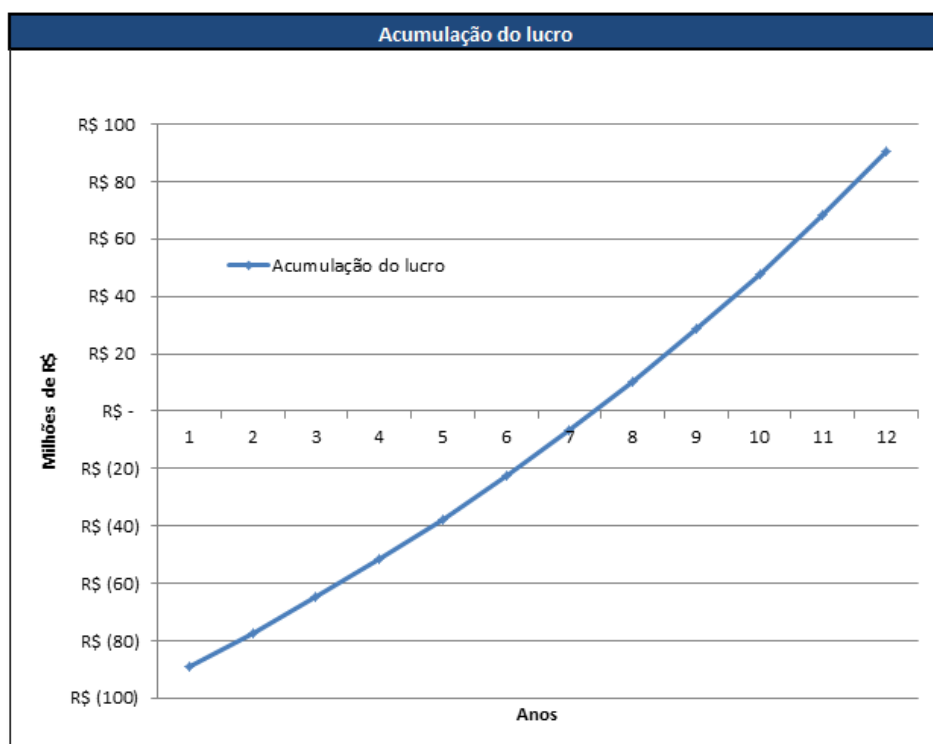


Figura 6.25: Apresentação de resultados – Gráfico de acumulação de lucros

7 - Estudos de caso

Como forma de testar e validar a consistência dos resultados calculados pela ferramenta que foi desenvolvida foi realizado um estudo de caso, com o objetivo de comparar estes resultados com valores reais de uma usina selecionada.

A usina escolhida para a realização do estudo de caso é uma usina localizada na região Centro-Sul do Brasil. Esta usina é descrita no artigo “Maximização da geração elétrica a partir do bagaço e palha em usina de açúcar e álcool”, escrito por Jair Arone Maués, coordenador de projetos especiais de energia na Petrobras, que foi publicado na revista Brasil Engenharia em 2007 (Maués, 2007). O autor não mencionou o nome da usina em seu artigo.

Para o estudo de caso em questão levou-se em consideração os seguintes pontos:

- ¶ Todos os dados reais da usina listados no artigo, e que eram relevantes para o estudo em questão;
- ¶ Para aqueles dados que eram necessários para os cálculos, mas que não foram fornecidos no artigo, foram feitas hipóteses com base em valores encontrados na literatura, em textos científicos ou divulgados por *players* relevantes do setor. Para estes casos, foi feita menção explícita à referência no texto, após apresentação dos dados.

Os primeiros resultados que foram simulados e testados foram aqueles referentes à quantificação da produção de açúcar e álcool. A Tabela 7.1 apresenta os parâmetros utilizados para a realização destes cálculos.

Tabela 7.1: Parâmetros referentes a produção de açúcar e álcool

Safra	2.000.000	[t]
Mix de produção da usina		
Açúcar	70	[%]
Álcool	30	[%]
Fábrica de açúcar		
Fator de recuperação	75	[%]
Polarização açúcar branco	99,7	[%]
Polarização açúcar VHP	99,3	[%]
Mix de produção		
Açúcar Branco	100	[%]
Açúcar VHP	0	[%]
Destilaria		
Densidade álcool absoluto	0,79	[kg/l]
% alcóolica álcool hidratado	93,8	[%]
% alcóolica álcool anidro	99,3	[%]
Rendimento da fermentação	90,4	[%]
Rendimento da destilação	99,8	[%]
Rendimento álcool hidratado	0,61	[l/kg _{ART}]
Rendimento álcool anidro	0,58	[l/kg _{ART}]
Mix de produção		
Álcool Hidratado	100	[%]
Álcool Anidro	0	[%]

Dados não fornecidos no artigo:

- ¶ O fator de recuperação de 75% foi baseado em valores fornecidos apresentados em Procknor (2010);
- ¶ As polarizações dos açúcares brancos e VHP foram baseadas em Oliveira *et al.* (2009);
- ¶ Segundo a ANP, o teor alcóolico do álcool hidratado varia de 92,6% a 93,8% e o do álcool anidro deve ser no mínimo 99,3% (ANP, 2002);

¶ Os parâmetros da destilaria foram baseados em Romão Júnior (2009).

A partir dos dados apresentados na Tabela 7.1, foram calculadas as quantidades produzidas de açúcar e álcool na usina. A Tabela 7.2 apresenta uma comparação entre os resultados obtidos através da ferramenta e os valores reais da usina.

Tabela 7.2: Comparação entre valores reais e simulados: produção de açúcar e álcool

Dado	Usina	Ferramenta	[Δ%]
Produção de açúcar branco [t]	196.000	197.690	0,86%
Produção de açúcar VHP [t]	0	0	0,00%
Produção de álcool hidratado [m³]	52.275	51.003	2,43%
Produção de álcool anidro [m³]	0	0	0,00%

Os resultados obtidos se mostraram muito próximos aos valores reais da usina, principalmente a quantidade produzida de açúcar. A quantidade calculada pela ferramenta, 197.690 toneladas de açúcar branco, apresentou uma variação de apenas 0,86% do valor real que é de 196.000 toneladas. Já a quantidade calculada para a produção de álcool hidratado, 51.003 litros, foi 2,43% inferior ao valor real, que é de 52.275 litros de álcool.

A usina sendo analisada neste estudo não produz nem açúcar VHP e nem álcool anidro.

Os valores obtidos e apresentados na Tabela 7.2 mostram que os cálculos realizados para quantificação da produção são bastante precisos, bem próximos dos valores reais da usina. Esta constatação foi um primeiro indício de que ferramenta Quantifica poderia representar um artifício confiável para representação da realidade de uma usina.

Após os cálculos da produção de açúcar e álcool, o próximo passo foi a quantificação da geração, do consumo interno e, conseqüentemente, do excedente de energia elétrica que estaria disponível para comercialização com a rede externa.

As Tabelas 7.3, 7.4 e 7.5 apresentam os dados que foram utilizados para a realização destes cálculos.

A Tabela 7.3 apresenta os parâmetros utilizados para caracterização da colheita da cana, que determinam a quantidade de palha que estará disponível para ser utilizada como combustível nas caldeiras geradoras de vapor.

Tabela 7.3: Parâmetros para caracterização da colheita

Mecanização da colheita	
Mecanizada	70 [%]
Manual	30 [%]
Palha deixada no campo	30 [%]
Tipo de lavagem	A seco
Eficiência da lavagem a seco	63 [%]
Utilização da lavagem a seco	90 [%]

Dados não fornecidos no artigo:

- ¶ A percentagem de 30% de palha que deve ser deixada no campo foi baseada em valores apresentados pela Valtra, fabricante de colhedoras (Valtra, 2011);
- ¶ Os parâmetros da lavagem a seco foram baseados em Romão Júnior (2009).

Já a Tabela 7.4 apresenta os parâmetros utilizados para definição das propriedades do bagaço e do tipo de extração do caldo da cana, que determinam a quantidade de bagaço que estará disponível para ser utilizada como combustível nas caldeiras geradoras de vapor.

Tabela 7.4: Dados referentes ao bagaço e tipo de extração

Fibra do bagaço	46,0 [%]
Bagaço na cana	26,0 [%]
Tipo de extração	Moagem
Eficiência da extração	96,0 [%]

Por fim, a Tabela 7.5 apresenta os parâmetros de caracterização do ciclo de geração de energia (como apresentado na Figura 5.1 deste trabalho).

Tabela 7.5: Dados sobre a geração e consumo de energia na usina

Rendimento da caldeira	86 [%]
Consumo de vapor no processo	480 [kg/t _{cana}]
Consumo esp. dos turboacionadores	5 [Kg _{vapor} /kW]
Consumo esp. do turbogerador	3 [Kg _{vapor} /kW]
Consumo específico da usina	40 [kWh/t _{cana}]

Dados não fornecidos no artigo:

- ¶ Segundo estudo da Secretaria do Meio Ambiente do Governo do Estado de São Paulo, o rendimento de caldeiras com combustível sólidos pode variar de 80 a 90% (Secretaria do Meio Ambiente – SP, 2010);
- ¶ Os consumos específicos dos turbogeradores e turboacionadores foram baseados em Romão Júnior (2009).

A partir dos parâmetros apresentados nas Tabelas 7.3, 7.4 e 7.5 acima, a ferramenta pode calcular os valores referentes à geração, consumo e venda de energia na usina. A Tabela 7.6 apresenta a comparação entre resultados obtidos através da ferramenta e os valores reais da usina.

Tabela 7.6: Comparação entre valores reais e simulados: geração, consumo interno e venda de excedente de energia

Dado	Usina	Ferramenta	[Δ%]
Geração de energia [GWh]	400	392	2,00%
Consumo interno [GWh]	80	80	0,00%
Venda de excedente [GWh]	320	301	2,50%

Mais uma vez, os resultados obtidos através de simulação na ferramenta Quantifica são bastante próximos dos valores reais da usina:

- ¶ A quantidade total gerada de energia encontrada, de 392 GWh, é 2,00% inferior a quantidade realmente gerada, de 400 GWh;
- ¶ O consumo interno de energia encontrado foi o mesmo apresentado na usina: 80 GWh;
- ¶ Por fim, a venda de excedente de energia encontrada, de 301 GWh, é 2,50% inferior à quantidade realmente vendida, de 320 GWh.

Os resultados apresentados na Tabela 7.6, juntamente com aqueles apresentados na Tabela 7.2, comprovam que a ferramenta Quantifica representa um instrumento preciso e eficiente para o cálculo dos parâmetros operacionais que ela se propõe a quantificar em

uma usina sucroalcooleira: a produção de açúcar e álcool e a geração, consumo e venda de energia. Prova-se então que é uma ferramenta capaz de simular a realidade em uma usina.

Como descrito na seção 6, além de quantificar os parâmetros acima mencionados, a ferramenta Quantifica também realiza uma análise financeira das usinas a serem estudadas, sendo capaz de calcular o tempo necessário para o retorno completo do investimento realizado para a construção da mesma.

O artigo utilizado como referência para a realização deste estudo de caso não apresentou nenhum dado financeiro real da usina estudada. Mesmo assim, foi realizada uma análise financeira utilizando-se valores gerais da indústria sucroalcooleira e dados de usinas similares, encontrados na literatura científica. A Tabela 7.7 mostra os parâmetros utilizados nesta análise financeira.

Tabela 7.7: Parâmetros financeiros

Investimento inicial	198.000.000	[R\$]
Inflação	5,8%	[% a.a.]
Aumento dos custos de prod.	5,8%	[% a.a.]
Preços de venda no mercado		
Açúcar Branco	48,43	[R\$/saca]
Açúcar VHP	38,10	[R\$/saca]
Álcool Hidratado	1188,00	[R\$/m ³]
Álcool Anidro	1328,00	[R\$/m ³]
Vinhaça	8,00	[R\$/m ³]
Energia	120,00	[R\$/MWh]
Custos de produção		
Açúcar Branco	943,1	[R\$/t]
Açúcar VHP	867,3	[R\$/t]
Álcool Hidratado	1327,6	[R\$/m ³]
Álcool Anidro	1413,5	[R\$/m ³]
Energia	35,70	[R\$/MWh]

- ¶ O investimento inicial para construção da usina foi baseado em Terciote (2011), para usina com capacidade de processamento anual de 2 milhões de toneladas de cana;
- ¶ De acordo com dados do IBGE, a inflação no Brasil em 2012 foi de 5,8%;
- ¶ Os preços de venda no mercado e os custos de produção de açúcar e álcool são aqueles apresentados na seção 6.3.3 deste trabalho, para a região Centro-Sul do Brasil;
- ¶ O preço de venda e o custo de produção de energia elétrica são aqueles apresentados em Dantas Filho, 2009.

A Figura 7.1, retirada da Aba 6 da ferramenta Quantifica, mostra que o tempo necessário para retorno completo do investimento foi estimado em aproximadamente 7,6 anos. Relembrando, este valor é somente ilustrativo neste estudo de caso, visto que não se conhece o valor real para a usina.

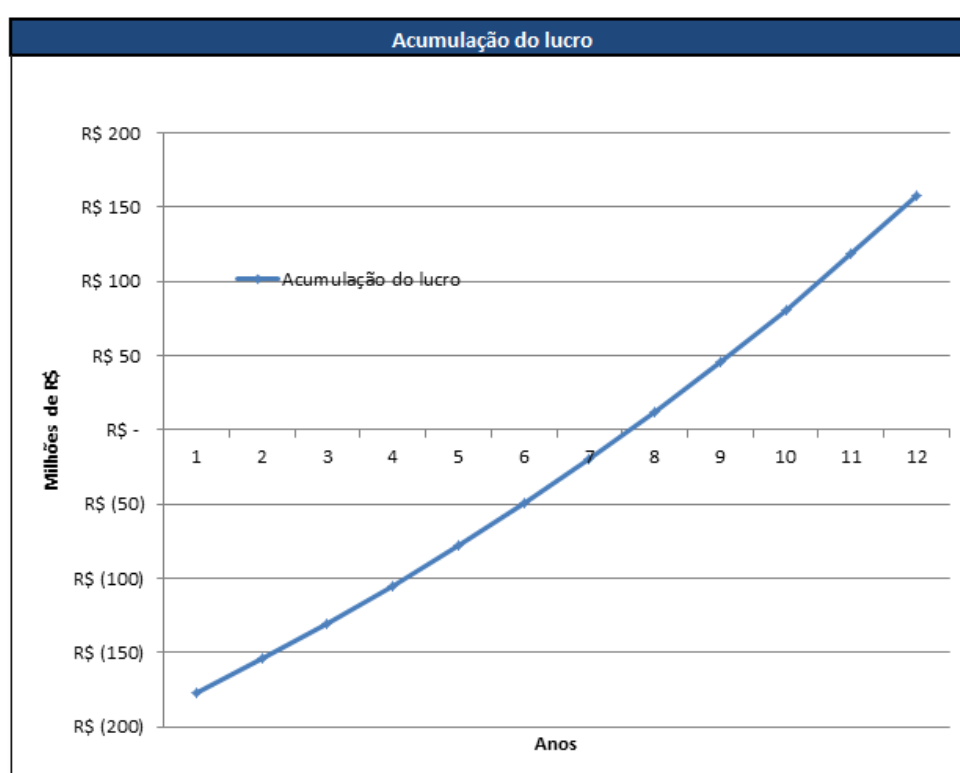


Figura 7.1: Tempo necessário para retorno de investimento

De modo a estender e completar as análises que compõem este estudo de caso, foi analisado o comportamento do tempo necessário para retorno do investimento quando se variava, separadamente, os seguintes parâmetros:

- ¶ Percentagem de mecanização da colheita;
- ¶ Preço de venda do açúcar e do álcool;
- ¶ Valor do investimento inicial.

Todas as análises foram feitas da seguinte forma: mantinha-se constante todos os parâmetros que foram utilizados na primeira etapa do estudo de caso, com exceção dos parâmetros listados acima. Estes parâmetros foram variados um a um, separadamente.

A Figura 7.2 mostra a influência da percentagem de mecanização da colheita no tempo necessário para retorno de investimento. Foram simulados os valores para um nível de mecanização de 70% (atual), 80% e 90%.

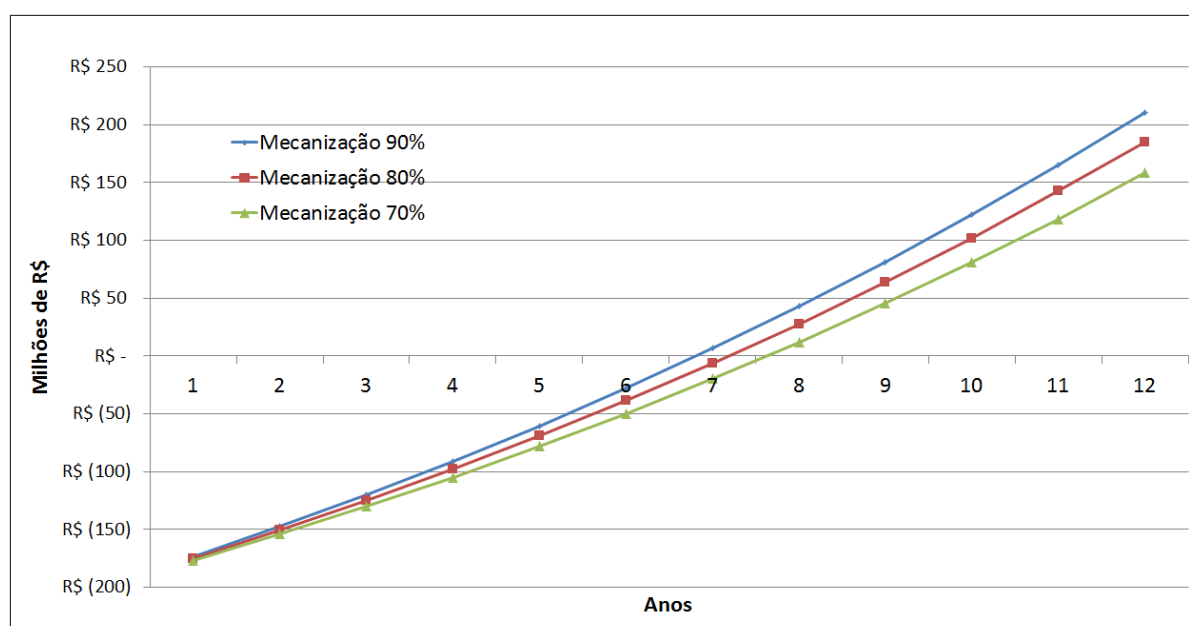


Figura 7.2: Influência da percentagem de mecanização no tempo necessário para retorno de investimento

A Tabela 7.8 apresenta um resumo dos resultados obtidos.

Tabela 7.8: Tempo necessário para retorno do investimento segundo mecanização da colheita

Cenário	Tempo necessário para retorno do investimento
Mecanização de 90%	Aprox. 6,8 anos
Mecanização de 80%	Aprox. 7,2 anos
Mecanização de 70% (atual)	Aprox. 7,6 anos

Como se pode perceber, quanto maior a percentagem de mecanização da colheita, menor é o tempo necessário para o retorno do investimento. Isto acontece porque quanto mais mecanizada é a colheita, menos palha é queimada ou deixada nos campos, e consequentemente mais palha é levada a usina. Isto, associado a um sistema de lavagem a seco eficiente, proporciona maior disponibilidade de palha para ser usada como combustível para alimentar a caldeira geradora de vapor, o que leva a um maior potencial para geração de energia.

Portanto, considerando-se que o consumo de energia elétrica na usina é mantido constante, a quantidade de energia excedente que estará disponível para comercialização é maior. Isto gera um aumento na receita anual da usina, referente à venda deste excedente de energia, o que reduz o tempo necessário para o retorno do investimento.

A Figura 7.3 mostra a influência do preço de venda do açúcar e do álcool no tempo necessário para retorno de investimento. Foram simulados os valores para índices de preços 3% inferior aos atuais, iguais aos índices atuais e 3% superior aos índices atuais.

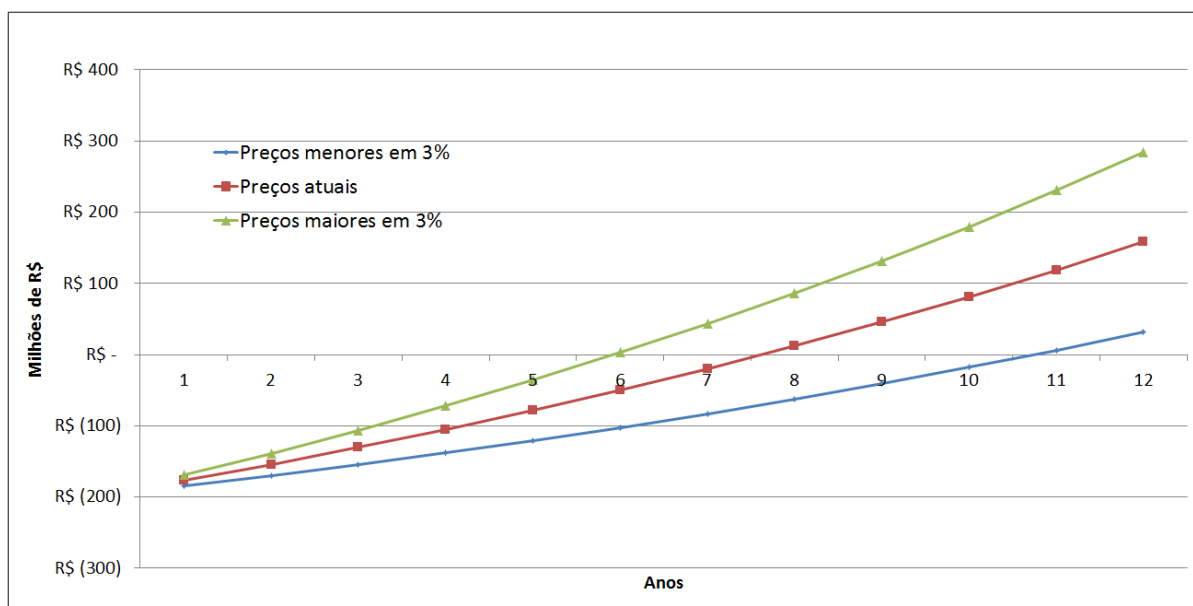


Figura 7.3: Influência do preço de venda de açúcar e álcool no tempo necessário para retorno de investimento

A Tabela 7.9 apresenta um resumo dos resultados obtidos.

Tabela 7.9: Tempo necessário para retorno do investimento segundo preço de venda do açúcar e do álcool

Cenário	Tempo necessário para retorno do investimento
Preços maiores em 3%	Aprox. 6 anos
Preços atuais	Aprox. 7,6 anos
Preços menores em 3%	Aprox. 10,7 anos

Como era de se esperar, considerando-se que os custos de produção se mantenham constantes, quanto maior é o preço de venda dos produtos finais de uma usina, menor é o

tempo necessário para o retorno completo do investimento realizado para a construção da mesma.

É interessante notar que uma mudança de apenas 3% para baixo nos preços de venda de açúcar e de álcool elevam em aproximadamente três anos o tempo necessário para retorno do investimento.

A Figura 7.4 mostra a influência do valor do investimento inicial no tempo necessário para o retorno de investimento da usina. Foram simulados os valores para um investimento similar ao considerado na primeira etapa do estudo de caso (R\$ 198), um investimento 20% inferior (R\$ 158,4 milhões) e um investimento 20% superior (R\$ 237,6 milhões).

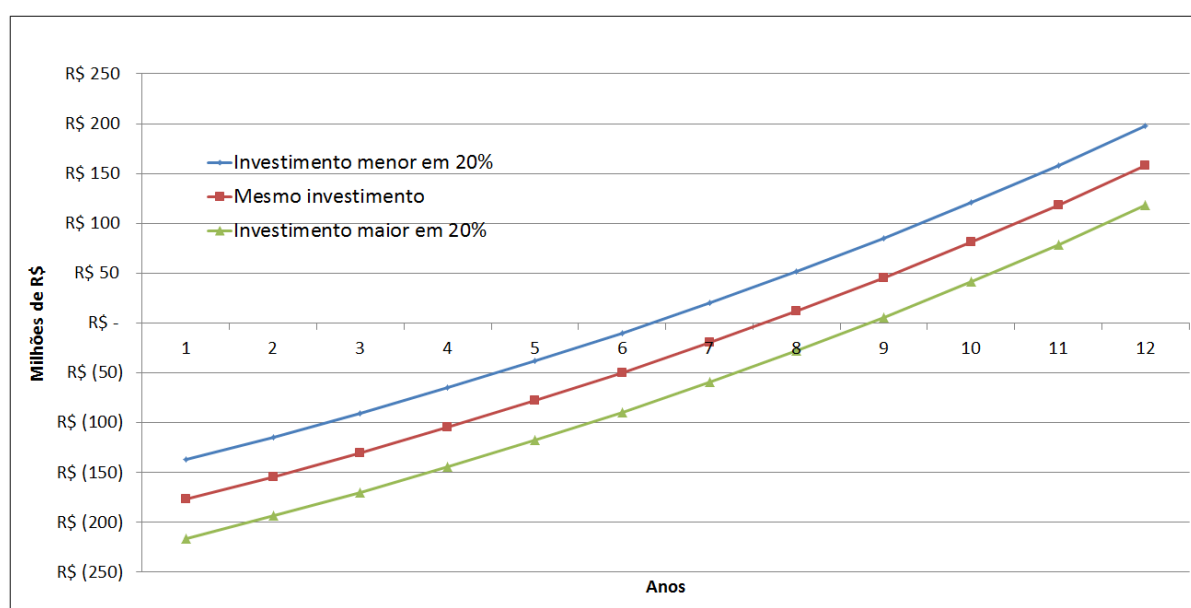


Figura 7.4: Influência do valor do investimento no tempo necessário para retorno de investimento

A Tabela 7.10 apresenta um resumo dos resultados obtidos

Tabela 7.10: Tempo necessário para retorno do investimento segundo valor do investimento inicial

Cenário	Tempo necessário para retorno do investimento
Investimento menor em 20%	Aprox. 6,4 anos
Mesmo investimento	Aprox. 7,6 anos
Investimento maior em 20%	Aprox. 8,8 anos

O investimento a ser realizado pode ser maior ou menor dependendo de diversos fatores:

- ¶ Cidade/ estado onde se está construindo a usina;
- ¶ Obtenção de subsídios;
- ¶ Escolha de fornecedores;
- ¶ Eficiência na construção (otimização do tempo);
- ¶ Eficiência na construção (otimização da mão-de-obra);
- ¶ Etc.

Os resultados mostram que, naturalmente, quanto maior é o investimento a ser realizado para a construção de uma usina sucroalcooleira, maior é o tempo que se leva para se obter o retorno completo deste investimento.

Portanto, ao se construir uma usina, investidores devem estar atentos a todos estes parâmetros, de maneira a diminuir o valor de seu investimento inicial. Diferentemente do preço do açúcar é álcool, que dependem da demanda do mercado e não podem ser controlados diretamente pelos produtores, o projeto de uma usina pode ser gerenciado da maneira correta, de modo a reduzir-se o tempo de retorno, e acelerar a acumulação de lucros.

8 - Conclusões

Como descrito no início deste texto, este trabalho teve dois grandes objetivos.

O primeiro era a realização de uma descrição completa do processo de produção de açúcar e álcool e da geração de energia em uma usina sucroalcooleira. Este primeiro objetivo visava fornecer a base teórica, conceitual e matemática para o cumprimento do segundo e principal objetivo: o desenvolvimento de uma ferramenta em Microsoft Excel que fosse capaz de quantificar este processo em completo. Assim, a partir de dados fornecidos pelo usuário, a ferramenta deveria calcular a capacidade produtiva da usina.

Os objetivos desse trabalho foram todos alcançados, e o resultado final do estudo foi a construção de uma ferramenta completa, que permite ao usuário criar e simular cenários variados de produção, explorando as diversas opções de configuração de uma usina. Essa diversidade é assegurada ao se permitir a realização de análises de sensibilidade através da variação de diferentes parâmetros, como o tipo de colheita, tipo de lavagem da cana, tipo de extração do caldo, dentre outras. Além disso, a ferramenta é capaz de fornecer uma análise econômica através do cálculo do tempo necessário para retorno do investimento de construção da usina a ser simulada.

Como pôde ser observado no estudo de caso realizado, a ferramenta se mostrou bastante precisa na realização dos cálculos da capacidade de produção da usina, tanto de açúcar e álcool, quanto de geração de energia, fornecendo resultados com variações mínimas em relação aos dados reais da usina considerada. Isto prova que a ferramenta está apta a ser utilizada como instrumento de auxílio na tomada de decisões no contexto do setor sucroalcooleiro.

9 - Referências

ANP, 2002. Portaria ANP Nº 45 – Regulamento técnico ANP 1/2001: Especificações do Álcool Etílico Anidro Combustível (AEAC) e do Álcool Etílico Hidratado Combustível (AEHC). Rio de Janeiro, RJ, Brasil. Disponível em: [http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll/leg/folder_portarias_anp/portarias_anp_tec/2001/mar%C3%A7o/panp%2045%20-%202001.xml?fn=document-frameset.htm\\$f=templates\\$3.0](http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll/leg/folder_portarias_anp/portarias_anp_tec/2001/mar%C3%A7o/panp%2045%20-%202001.xml?fn=document-frameset.htm$f=templates$3.0)

BNDES, 2012. “Setor Sucroalcooleiro Brasileiro: Evolução e Perspectivas”. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

CORREA NETO, V., RAMON, D., VIBHAVA CONSULTORIA EMPRESARIAL S/C LTDA, 2002. “Análises de opções tecnológicas para projetos de co-geração no setor sucroalcooleiro.” *SETAP – Sustainable Energy Technology Assistance Program*, Brasília, DF, Brasil.

CORTEZ, L. A. B., VERDE LEAL, M. R. L., 2010. “Uso da palha da Cana vs Emissões de GEE”. Oficina de Trabalho Sustentabilidade do Bioetanol, Brasília, DF, Brasil.

DAL BEM, A. J *et al.*, 2006. “Modelagem e simulação para o processo industrial de fabricação de açúcar e álcool”. *Minerva*, 3(1): 33-46, SP, Brasil.

DANTAS FILHO, P. L., 2009. “Análise de custos na geração de energia com bagaço de cana-de-açúcar: um estudo de caso em quatro usinas de São Paulo”. Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, SP, Brasil.

DEDINI, “Separação e Limpeza de Cana – SLC”. Catálogo da empresa, Campinas, São Paulo, Brasil.

DEDINI, 2011. “Sistemas de extração do caldo... moenda e difusor!!!” Apresentação da empresa, Piracicaba, SP, Brasil.

FERREIRA, H. H., 2011. “O poder energético do bagaço da cana-de-açúcar em co-geração”. Faculdade de Tecnologia de Araçatuba – FATEC, Araçatuba, SP, Brasil.

FIOMARI, M. C., 2004. “Análise energética e exergética de uma usina sucroalcooleira do Oeste Paulista com sistema de cogeração de energia em expansão”. Universidade Estadual Paulista – UNESP, Ilha Solteira, SP, Brasil.

HOPPE, S., ASSIS SHIKIDA, P. F., SILVA, J. R., 2009. “Análise econômico-financeira da implantação de uma destilaria para produção de álcool carburante a partir da mandioca”. Urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana, vol. 1, núm. 2, *julio-diciembre*, 2009, pp. 245-257, Curitiba, PR, Brasil.

IBGE, 2013. “Contas Nacionais Trimestrais – Indicadores de Volume e Valores Correntes”. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

JORNAL DA USP, 2009. “Equipamento de limpeza a seco de cana-de-açúcar sai do laboratório.” Jornal da USP, 9 de março de 2009, pp. 4-5, Ribeirão Preto, SP, Brasil.

KITAYAMA, O., 2007. “Tecnologia e operação de unidades de bioeletricidade a partir de biomassa de cana-de-açúcar – condições operacionais”. Assembléia Legislativa da ÚNICA, São Paulo, SP, Brasil.

MACHADO, F. B. P., 2003. “Brasil, a doce terra: história do setor sucroalcooleiro”. Disponível em: <<http://www.jornalcana.com.br/conteudo/HistoriadoSetor.asp>>

MAUÉS, J. A., 2007. “Maximização da geração elétrica a partir do bagaço e palha em usina de açúcar e álcool”. Revista Brasil Engenharia, n. 583, pp. 88-95, São Paulo, SP, Brasil.

MEZAROBA, S., MENEGUETTI, C. C., GROFF, A. M., 2010. “Processos de produção do açúcar da cana e os possíveis reaproveitamentos dos subprodutos e resíduos resultantes do sistema”. IV Encontro de Engenharia de Produção Agroindustrial, Campo Mourão, PR, Brasil.

OLIVEIRA, D.T., ESQUIAVETO M.M.M., SILVA JÚNIOR, J.F., 2007. “Impacto dos itens da especificação do açúcar na indústria alimentícia”. Ciências Tecnológicas Alimentícias, Campinas, 27(supl.): 99-102, ago. 2007, Campinas, SP, Brasil.

PAOLIELLO, J. M. M., 2006. “Aspectos ambientais e potencial energético no aproveitamento de resíduos da indústria sucroalcooleira”. Universidade Estadual Paulista – UNESP, Bauru, SP, Brasil.

PECEGE, 2012. “Custos de produção de cana-de-açúcar, açúcar e etanol no Brasil: Fechamento da Safra 2011/2012”. Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Programa de Educação Continuada em Economia e Gestão de Empresas/ Departamento de Economia, Administração e Sociologia. Relatório apresentado à Confederação de Agricultura e Pecuária do Brasil – CNA, Piracicaba, SP, Brasil.

PELLEGRINI, Maria Cristina, 2002. “Inserção de Centrais Cogeneradoras a Bagaço de Cana no Parque Energético do Estado de São Paulo: Exemplo de Aplicação de Metodologia para Análise dos Aspectos Locacionais e de Integração Energética”. Programa Interunidades de Pós- Graduação em Energia – PIPGE (EP/FEA/IEE/IF), São Paulo, SP, Brasil.

ROCHA, G., 2010. “Análise termodinâmica, termoeconômica e econômica de uma usina sucroalcooleira com processo de extração por difusão”. Universidade Estadual Paulista – UNESP, Ilha Solteira, SP, Brasil.

ROMÃO JÚNIOR, R. A., 2009. “Análise da viabilidade do aproveitamento da palha da cana de açúcar para cogeração de energia numa usina sucroalcooleira”. Universidade Estadual Paulista – UNESP, Ilha Solteira, SP, Brasil.

SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE – GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2010. “Eficiência energética na gestão ambiental – O conceito da Qualidade na Energia”. São Paulo, SP, Brasil.

TERCIOTE, R., 2011. “Impactos econômicos da implementação das novas usinas de cana-de-açúcar”. Universidade de Campinas – UNICAMP, Campinas, São Paulo, Brasil.

UMERABA, T., 2010. “Microfiltração de caldo de cana: caracterização do caldo permeado e retentado”. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil.

VALTRA, 2011. “Um fardo gigante de biomassa por minuto. Inovação: Enfardadora Challenger LB34B”. Revista Valtra & Você, ed. 2, ano 1, pp. 10-11, Mogi das Cruzes, SP, Brasil.

Sites (acessados em janeiro de 2013)

PROCKNER, 2010. “Terceira Massa”. Disponível em <http://www.procknor.com.br/articles/terceira-massa-stab-janfev-2010/>

Sites (acessados em fevereiro de 2013)

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, 2013. “Vegetal – Culturas – Cana-de-açúcar”. Disponível em <http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/cana-de-acucar>

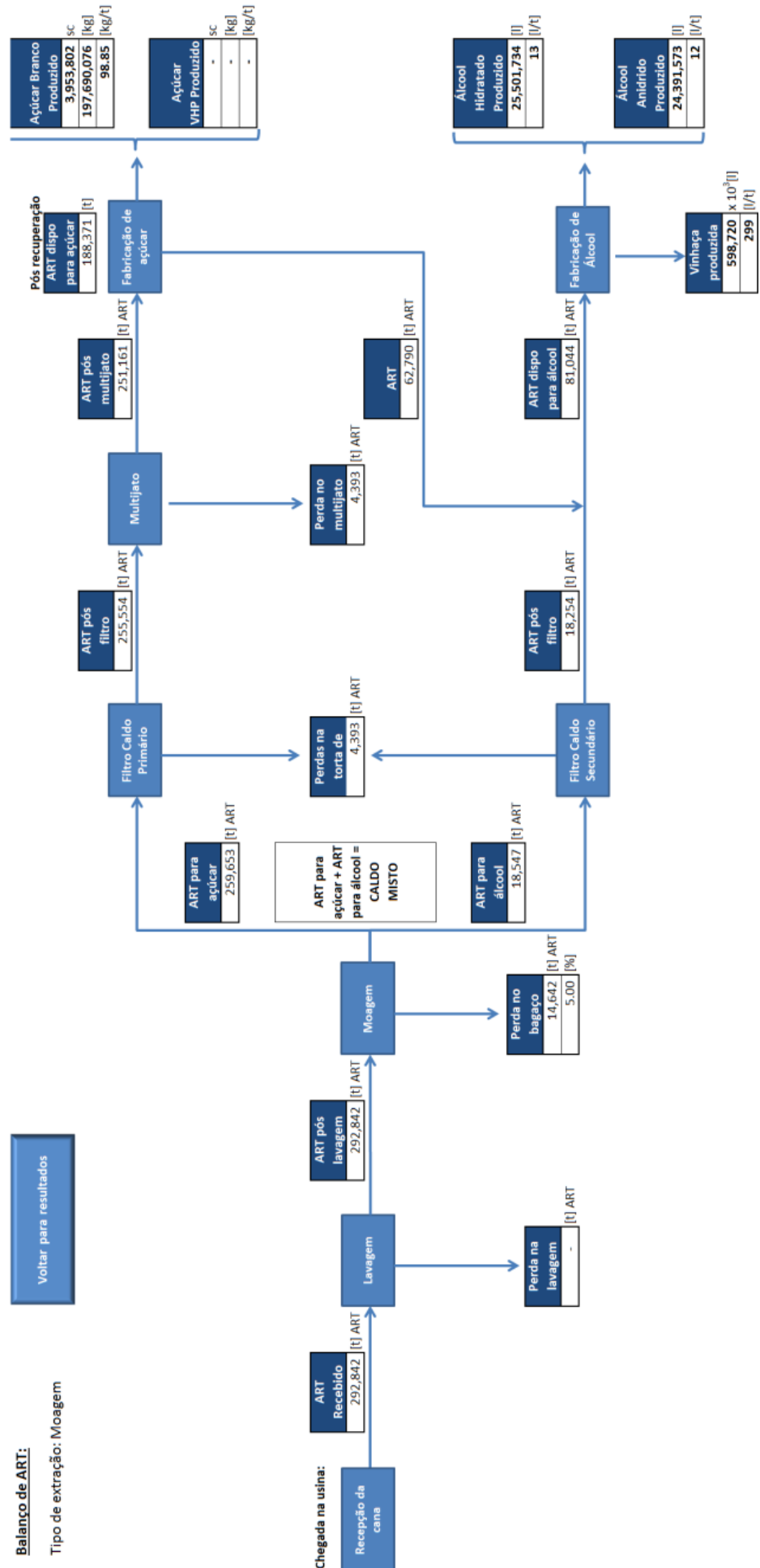
MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, 2013. “Estatísticas da Agroenergia”. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/desenvolvimento-sustentavel/agroenergia/estatistica>

Sites (acessados em março de 2013)

RURAL BR AGRICULTURA, 2012. “Resíduos agropecuários: cana de açúcar é a cultura que mais produz resíduos no Brasil”. Disponível em: <http://agricultura.ruralbr.com.br/noticia/2012/06/residuos-agropecuarios-cana-de-acucar-e-a-cultura-que-mais-produz-residuos-no-brasil-3778524.html>

UNICA, 2013. “Histórico de Produção e Moagem”. Disponível em: <http://www.unicadata.com.br/historico-de-producao-e-moagem.php?idMn=31&tipoHistorico=2>

Apêndice A



Apêndice B

	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6
Receitas	R\$ 289.519.253	R\$ 306.311.370	R\$ 324.077.429	R\$ 342.873.920	R\$ 362.760.607	R\$ 383.800.723
Açúcar Branco	R\$ 191.482.608	R\$ 202.588.599	R\$ 214.338.738	R\$ 226.770.384	R\$ 239.923.067	R\$ 253.838.604
Açúcar VHP	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Álcool Hidratado	R\$ 60.592.120	R\$ 64.106.463	R\$ 67.824.638	R\$ 71.758.467	R\$ 75.920.458	R\$ 80.323.844
Álcool Anidro	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Vinhaça	R\$ 4.896	R\$ 5.180	R\$ 5.481	R\$ 5.799	R\$ 6.135	R\$ 6.491
Venda de Energia	R\$ 37.439.629	R\$ 39.611.128	R\$ 41.908.573	R\$ 44.339.270	R\$ 46.910.948	R\$ 49.631.783

Custos	-R\$ 268.155.912	-R\$ 283.708.955	-R\$ 300.164.074	-R\$ 317.573.591	-R\$ 335.992.859	-R\$ 355.480.445
Investimento	-R\$ 198.000.000	-R\$ -	-R\$ -	-R\$ -	-R\$ -	-R\$ -
Açúcar Branco	-R\$ 186.449.418	-R\$ 197.263.484	-R\$ 208.704.767	-R\$ 220.809.643	-R\$ 233.616.602	-R\$ 247.166.365
Açúcar VHP	-R\$ -	-R\$ -	-R\$ -	-R\$ -	-R\$ -	-R\$ -
Álcool Hidratado	-R\$ 67.712.204	-R\$ 71.639.512	-R\$ 75.794.604	-R\$ 80.190.691	-R\$ 84.841.751	-R\$ 89.762.572
Álcool Anidro	-R\$ -	-R\$ -	-R\$ -	-R\$ -	-R\$ -	-R\$ -
Energia	-R\$ 13.994.290	-R\$ 14.805.958	-R\$ 15.664.704	-R\$ 16.573.257	-R\$ 17.534.506	-R\$ 18.551.507

Resultado anual	-R\$ 176.636.659	R\$ 22.602.415	R\$ 23.913.355	R\$ 25.300.329	R\$ 26.767.749	R\$ 28.320.278
------------------------	-------------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------

Acúmulo do lucro	-R\$ 176.636.659	-R\$ 154.034.244	-R\$ 130.120.889	-R\$ 104.820.560	-R\$ 78.052.811	-R\$ 49.732.533
-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	------------------------	------------------------

	Ano 7	Ano 8	Ano 9	Ano 10	Ano 11	Ano 12
Receitas	R\$ 406.061.165	R\$ 429.612.712	R\$ 454.530.249	R\$ 480.893.004	R\$ 508.784.798	R\$ 538.294.316
Açúcar Branco	R\$ 268.561.244	R\$ 284.137.796	R\$ 300.617.788	R\$ 318.053.619	R\$ 336.500.729	R\$ 356.017.772
Açúcar VHP	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Álcool Hidratado	R\$ 84.982.627	R\$ 89.911.620	R\$ 95.126.494	R\$ 100.643.830	R\$ 106.481.173	R\$ 112.657.081
Álcool Anidro	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Vinhaça	R\$ 6.867	R\$ 7.266	R\$ 7.687	R\$ 8.133	R\$ 8.605	R\$ 9.104
Venda de Energia	R\$ 52.510.426	R\$ 55.556.031	R\$ 58.778.281	R\$ 62.187.421	R\$ 65.794.292	R\$ 69.610.361

Custos	-R\$ 376.098.310	-R\$ 397.912.012	-R\$ 420.990.909	-R\$ 445.408.382	-R\$ 471.242.068	-R\$ 498.574.108
Investimento	-R\$ -	-R\$ -	-R\$ -	-R\$ -	-R\$ -	-R\$ -
Açúcar Branco	-R\$ 261.502.014	-R\$ 276.669.131	-R\$ 292.715.941	-R\$ 309.693.466	-R\$ 327.655.687	-R\$ 346.659.716
Açúcar VHP	-R\$ -	-R\$ -	-R\$ -	-R\$ -	-R\$ -	-R\$ -
Álcool Hidratado	-R\$ 94.968.801	-R\$ 100.476.992	-R\$ 106.304.657	-R\$ 112.470.328	-R\$ 118.993.607	-R\$ 125.895.236
Álcool Anidro	-R\$ -	-R\$ -	-R\$ -	-R\$ -	-R\$ -	-R\$ -
Energia	-R\$ 19.627.495	-R\$ 20.765.889	-R\$ 21.970.311	-R\$ 23.244.589	-R\$ 24.592.775	-R\$ 26.019.156

Resultado anual	R\$ 29.962.854	R\$ 31.700.700	R\$ 33.539.340	R\$ 35.484.622	R\$ 37.542.730	R\$ 39.720.208
------------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------

Acúmulo do lucro	-R\$ 19.769.679	R\$ 11.931.020	R\$ 45.470.361	R\$ 80.954.983	R\$ 118.497.713	R\$ 158.217.921
-------------------------	------------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	------------------------	------------------------